

ANNALEN DER PHYSIK

5. FOLGE, 1929, BAND 2, HEFT 2

Beiträge zur Raumakustik

Von W. Schindelin¹⁾

(Mit 50 Figuren)

In den letzten Jahren macht sich in der Schalltechnik immer stärker das Bedürfnis nach Prüfungsmethoden geltend, die es gestatten, die wichtigsten akustischen Eigenschaften von Räumen, ihre Mängel und deren Ursachen festzustellen.

Die früheren raumakustischen Messungen beruhen vielfach auf physiologischen Methoden.²⁾ Mit dem Ohr kann man aber zeitlich schnell aufeinanderfolgende Schallvorgänge nicht mehr trennen und muß sich daher auf die Bestimmung der Lautstärke und Nachhalldauer beschränken. Das Ohr entscheidet zwar letzten Endes über die Akustik eines Raumes. Um aber die Ursache einer schlechten Akustik feststellen zu können, muß man eine physikalische Meßmethode zur Untersuchung benutzen, die es gestattet, den Verlauf des Schallvorganges zu registrieren. Man ist denn auch in neuerer Zeit allgemein zu physikalischen Methoden übergegangen.

I. Voruntersuchungen

A. Richtwirkung von Schallsendern und Schallempfängern

Bei Schallmessungen in einem Raum gehen von der Schallquelle Schallstrahlen nach allen Richtungen hin aus und werden

1) Gekürzte Doktordissertation der Technischen Hochschule München, eingereicht am 18. April 1928. Die Arbeit wurde auf Anregung und unter Leitung von Hrn. Prof. Dr. J. Zenneck gemeinsam mit E. Scharstein im Physikalischen Institut der Technischen Hochschule ausgeführt.

Zu Dank verpflichtet sind wir der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft und der Helmholtzgesellschaft für die Überlassung der für unsere Messungen benötigten Apparate. Auch Hrn. Prof. G. Baumgartner möchten wir für die liebenswürdige Unterstützung bei der Untersuchung der Münchener Rundfunksenderräume unseren Dank aussprechen.

2) Eine ausführliche Zusammenstellung der Literatur befindet sich in dem Handbuch der Physik von Geiger u. Scheel, Akustik 8. 1927.

von den Wänden reflektiert. Das Bild im Schallempfänger ist daher stark abhängig von der Richtwirkung sowohl des Senders als auch des Empfängers. Es war also wichtig, die Richtwirkung der von uns benutzten Meßgeräte zu kennen.

Diese Richtwirkungsmessungen wurden auf dem Dach des Physikalischen Instituts der Technischen Hochschule München durchgeführt. Das Institut besitzt ein großes, flaches Dach von 43 m Länge und 16 m Breite. Da dasselbe frei von allen reflektierenden Flächen ist, eignet es sich vorzüglich für akustische Versuche. Durch induktionsfreie Leitungen können die zur Messung notwendigen Spannungen aus den Laboratoriumsräumen hinaufgeleitet werden. Um Reflexionen des Bodens zu vermeiden, wurden die Schallquelle und das Empfangstelephon in bekannter Weise direkt auf dem Boden aufgestellt.

1. Lautsprecher

Als Schallquelle diente für die Tonprüfung von Räumen eine elektromagnetische Lautsprecherdose mit einem geraden, kegelförmigen Papptrichter von 30 cm Länge und 14 cm Öffnungs durchmesser.

Der Charakter eines Richtwirkungsdiagramms ist natürlich sehr stark abhängig von der Tonhöhe. Die aufgenommene Kurve wurde bei einer mittleren Frequenz von 500 Sek. gemessen. Die Abmessungen des Lautsprechers waren also bedeutend kleiner als die Wellenlänge, und eine starke Richtwirkung war nicht zu erwarten.

Bei dem Richtwirkungsdiagramm des Lautsprechers (Fig. 1) wurde der Lautsprecher gedreht und die Schallintensität als Funktion des Winkels zwischen der Lautsprecherachse und dem Empfangstelephon aufgenommen. Die relative Schallintensität wurde gemessen mit einem kleinen Telefon, dessen Spannung von einem Widerstandsverstärker verstärkt wurde. Der Ausgangstrom des Verstärkers wurde gleich gerichtet und mit einem Galvanometer gemessen. Die Galvanometerausschläge sind als Radianvektoren in den gemessenen Winkeln aufgetragen.

Kurve a wurde bei windstillem Wetter aufgenommen. Die Figur hat etwa die Form einer Ellipse, in deren Mittelpunkt der Lautsprecher steht. Die Richtwirkung ist sehr gering.

Am stärksten strahlt der Lautsprecher nach vorn und hinten, etwas weniger nach den Seiten.

Von sehr großem Einfluß auf die gemessenen Werte war der Wind. Selbst geringe Windstöße riefen sehr große Schalldruckänderungen hervor. Die Kurve b wurde bei Windstärke 1 bis 2 aufgenommen. Die Ausschläge auf der Lee-Seite sind sehr viel größer als die entsprechenden Werte der Luv-Seite.

Der Maßstab für die Kurven a und b ist nicht derselbe. Willkürlich wurden die Amplituden in Richtung der Lautsprecherachse einander gleichgesetzt.

Um möglichst gerichteten Schall auszusenden, wurde die Lautsprecherdose ohne Trichter im Brennpunkt eines Hohlspiegels von 50 cm Durchmesser aufgestellt (Fig. 2).

Aufgenommen wurde dieses Richtwirkungsdiagramm (Fig. 3) mit einer Periodenzahl von $f \approx 1500/\text{Sek.}$, damit der Spiegel-durchmesser groß im Verhältnis zur Wellenlänge war ($d \approx 2\lambda$).

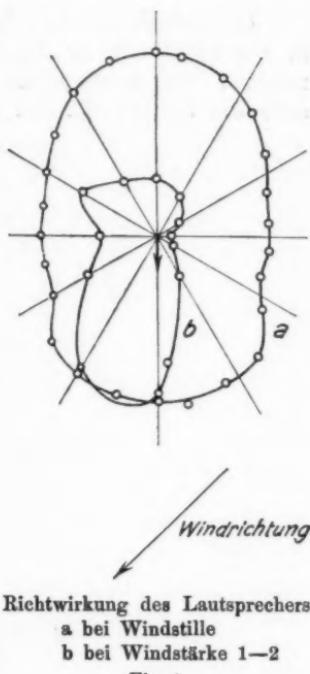
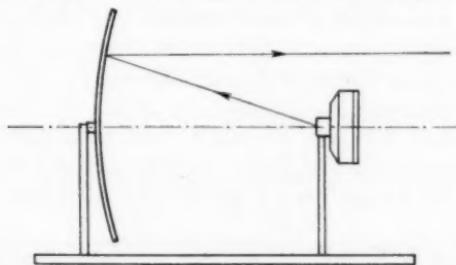


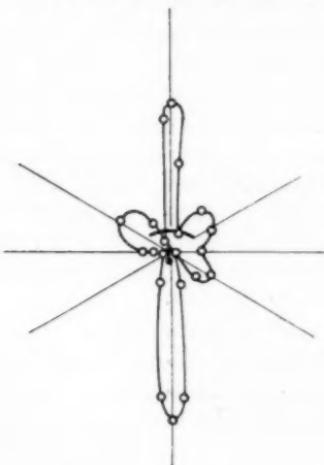
Fig. 1



Lautsprecherdose im Brennpunkt eines Hohlspiegels

Fig. 2

Das Polardiagramm zeigt ein stark ausgeprägtes Maximum in der Strahlrichtung des Spiegels und eine Reihe Nebenmaxima. Das ausgesprochene Druckmaximum auf der Rückseite des Spiegels ist auf Beugung zurückzuführen. Es ist



Richtwirkung des Lautsprechers mit Spiegel
Fig. 3

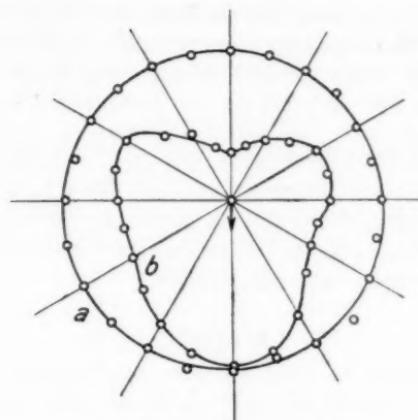
das Analogon zu dem in der Optik bekannten hellen Fleck im Mittelpunkt des Schattens einer Kreisscheibe.¹⁾

2. Telephon

Vernachlässigbar klein ist die Richtwirkung des Telephons, da seine Abmessungen im Vergleich zur Wellenlänge des Schalles sehr klein sind. Das bei der Frequenz 500/Sek. aufgenommene Polardiagramm Fig. 4, Kurve a ist fast kreisförmig.

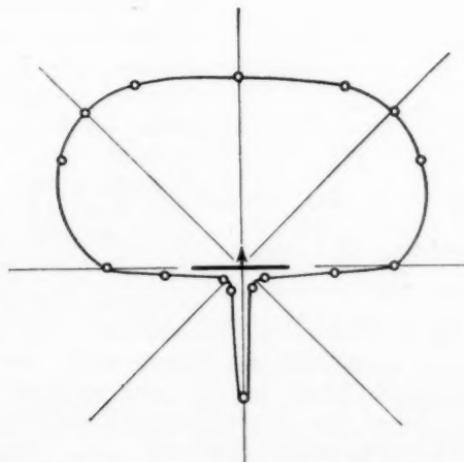
Setzt man auf das Telefon ein Rohr auf, dessen Länge gleich $\frac{1}{2}$ oder $\frac{3}{4} \lambda$ ist, so erhält man eine geringe Richtwirkung (Kurve b in Fig. 4 für $l = \frac{3}{4} \lambda$), während sie bei einem Rohr von der Länge $l = \frac{1}{2} \lambda$ wieder sehr klein ist.

1) A. Winkelmann, Handbuch der Physik 2. S. 576. 1909. — Über Richtwirkung von Schallquellen vgl.: F. Trendelenburg, Wissenschaftl. Veröffentl. d. Siemens-Konz. 5. S. 120. 1926. Stenzel, ENT. 4. S. 239. 1927.



Richtwirkung des Telefons

Fig. 4



Richtwirkung des Telefons in einer quadratischen Platte

Fig. 5

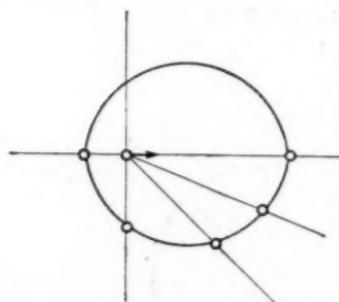
Bei einem anderen Versuch wurde das Telefon in eine quadratische Eisenblechplatte von 1 m Seitenlänge eingebaut. Lautsprecher und Telefon wurden 3 m über dem Boden auf-

gestellt, um Reflexionen des Bodens auszuschalten. Die bei diesem Richtwirkungsversuch benutzte Frequenz wurde wieder höher gewählt, damit die Abmessungen der Platte groß waren im Verhältnis zur Wellenlänge ($f = 1500/\text{Sek.}$, $\lambda = 23 \text{ cm}$).

Die Fig. 5 weist zwar auf der Vorderseite der Platte keine bevorzugte Richtung auf, aber auf der Rückseite zeigt sich wieder das scharfe Beugungsmaximum, das man erhält, wenn der Schall senkrecht auf die Rückseite der Platte trifft. Mit Hilfe dieses ausgeprägten Beugungsmaximums ist das Anpeilen eines Schallsenders sehr gut möglich.

3. Pistole

Von besonderem Interesse war die Messung der Richtwirkung einer Pistole, die wir als Schallquelle für die Stoßprüfung von Räumen verwenden wollten.



Richtwirkung der Pistole

Fig. 6

Sie konnte natürlich nicht mit der gleichen Empfangsanordnung gemessen werden. Wir benutzten dazu das im nächsten Abschnitt beschriebene Meßgerät. Die Schüsse wurden oszillographiert. Im Richtwirkungsdiagramm Fig. 6 wurde dann bei jedem Winkel die zugehörige Maximalamplitude des Oszillogramms als Radiusvektor aufgetragen.

Die Fig. 6 zeigt einen ellipsenförmigen Kurvenzug, in dessen einem Brennpunkt die Pistole steht. Der von der Pistole ausgehende Schall ist also sehr stark gerichtet, die Druckamplitude ist rund viermal so groß in der Schufrichtung als in der entgegengesetzten Richtung.

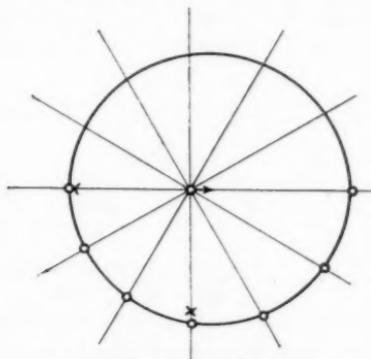
Diese starke Richtwirkung¹⁾ ermöglicht es, das Aufnahmemikrofon sehr nahe bei der Pistole aufzustellen. Steht das Mikrofon dicht hinter der Pistole, so trifft der direkte Schall

1) Diese Richtwirkung ist bekannt und auch beim Behmschen Echolot schon verwendet worden.

nur mit so geringer Intensität auf dasselbe, daß die Amplitude der Reflexionen im Raum von der gleichen Größenordnung ist, ja den direkten Schall an Stärke oft noch übertrifft.

4. Reißmikrophon

Demgegenüber spielt die Richtwirkung des Reißmikrofons eine untergeordnete Rolle. Aufgenommen wurde die Fig. 7 bei etwa 500/Sek. Es tritt hier ein maximaler Amplitudenunterschied von 30 Proz. auf, wenn Schall von gleicher Inten-



Richtwirkung des Reißmikrofons

Fig. 7

sität einmal auf die Vorderseite, das andere Mal auf die Rückseite des Mikrofons trifft. Die in Fig. 7 mit Kreuzen gekennzeichneten Meßpunkte wurden viel früher aus Schußdiagrammen gewonnen und stimmen sehr gut mit der Richtwirkungskurve bei der Frequenz 500/Sek. überein.

B. Die Empfangsanordnung

Beim Zusammenbau der von uns benutzten Meßapparatur wurde vor allem darauf Wert gelegt, daß sie möglichst leicht und handlich wurde; es sollten auch in Räumen, die uns nur stundenweise zur Verfügung standen, Messungen ausgeführt werden können.

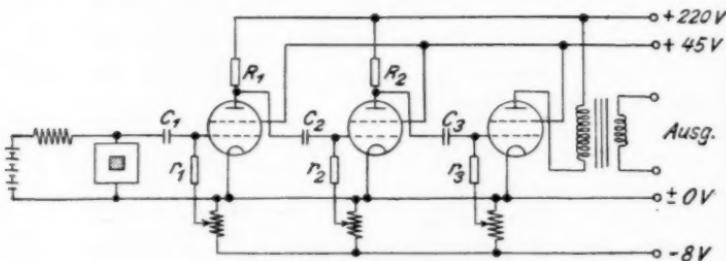
Als Schallempfänger diente ein Reißmikrophon älterer Bauart¹⁾, das uns die Firma Telefunken in sehr entgegen-

1) F. Weichert, Jahrb. d. drahtl. Tel. 28. S. 122. 1926.

kommender Weise zur Verfügung stellte. Das Reißmikrophon ist ein Kohlemikrophon, bei dem feiner, präparierter Kohlestaub als Kontaktmaterial verwendet und durch eine dünne Gummihaut als Membran vor dem Einfluß der Feuchtigkeit geschützt ist.

Bei den Stoßprüfungsaufnahmen wurde das Mikrophon ohne Eingangstransformator an das Gitter des 1. Rohres eines Widerstandsverstärkers gelegt, dessen Schaltbild in Fig. 8 wiedergegeben ist.

Wahlweise konnten 2 oder 3 Verstärkerrohre eingeschaltet werden, je nach der aufzunehmenden Schallamplitude. Der



Schaltbild des Empfängers

Rohrtype SSIIL. 114; $R_1, R_2 = 150\,000 \Omega$; $C_1, C_2, C_3 = 50\,000 \text{ cm}^{-3}$;
 $r_1 = 150\,000 \Omega$; $r_2, r_3 = 250\,000 \Omega$

Fig. 8

Ausgang des Verstärkers führte über einen Transformator von geringem Übersetzungsverhältnis zur Meßschleife eines Oszillographen der Siemens & Halske A.-G., um die hohe Anodenspannung von der Meßschleife fernzuhalten. Der Transformator war durch die Meßschleife praktisch kurzgeschlossen, so daß die Übersetzungsfehler sehr gering waren. Seine Verzerrungsfreiheit wurde durch mehrere Oszillogramme geprüft.

Um ein möglichst leichtes Empfangsgerät zu erhalten, wurde auf ein Endverstärkerrohr von größerer Leistung verzichtet, das größere Stromquellen erforderlich gemacht hätte. Bei Vergleichsaufnahmen zeigte es sich, daß die für die Messungen wesentlichen Einzelheiten auch von der empfindlichen Meßschleife mit 4 mA Maximalbelastung trotz ihrer geringeren Eigenschwingungszahl noch gut wiedergegeben wurden.

Im Oszillographen wurde dann die Schalldruckkurve in ihrer zeitlichen Abhängigkeit photographisch aufgenommen. Diese Kurve nennt man in der Schalltechnik die Schwingungsform oder das Klangbild¹⁾ eines Schallvorganges.

Absolute Schalldruckmessungen waren bei den folgenden Untersuchungen unnötig.²⁾ Die Proportionalität des Röhrenverstärkers prüften wir auf elektrischem Wege.

Die relative Amplitudenabhängigkeit der ganzen Empfangsanordnung³⁾ wurde auf dem Dach gemessen. Das Reißmikrofon

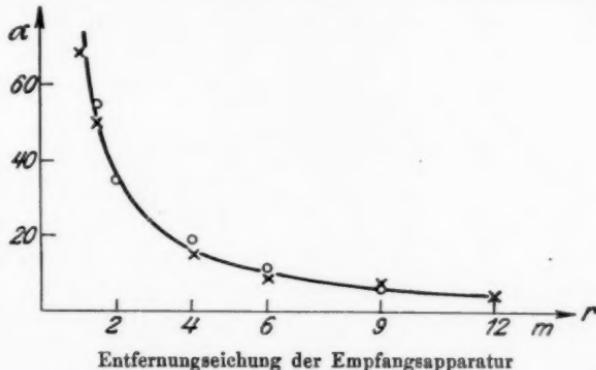


Fig. 9

wurde in verschiedenen Entfernungen von dem Lautsprecher aufgestellt und bei gleichbleibender Empfindlichkeitseinstellung der Ausschlag der Oszillographenschleife gemessen.

Bei der Ausbreitung von Schallwellen im Raum nimmt die Schallintensität J mit dem Quadrat des Abstandes von der Schallquelle ab, vorausgesetzt, daß die Schallquelle keine starke Richtwirkung besitzt. (Das Richtwirkungsdiagramm des benutzten Lautsprechers zeigt Fig. 1.) Da die Amplitude des Schalldrucks P proportional \sqrt{J} ist, nimmt sie umgekehrt

1) H. Geiger u. K. Scheel, Handb. der Physik 8. S. 570. 1927.

2) E. Meyer, Über Eichung von Schallempfängern. E. N. T. 3. S. 290. 1926; F. Trendelenburg, Wiss. Veröff. d. Siemens-Konz. 5 [2]. S. 120 ff. 1926.

3) H. Geiger u. K. Scheel, Über die Amplitudenkurve des Reißmikrofons. Handb. d. Physik 8. S. 557. 1927.

proportional mit der Entfernung r von der Schallquelle ab. Trägt man die Funktion $P = f(r)$ in einem Koordinatensystem auf, so erhält man eine Hyperbel. Die Fig. 9 zeigt die Ergebnisse der beiden Meßreihen. Die durch die Meßpunkte gezogene Kurve ist eine gerechnete Hyperbel, die den Verlauf der Meßreihen sehr gut wiedergibt.

II. Die Untersuchungsmethoden

Zwei Meßmethoden waren es, mit denen wir Räume untersuchten: die „*Stoßprüfung*“ und die „*Tonprüfung*“.¹⁾

Der Gedanke bei der *Stoßprüfung* ist folgender: In dem zu untersuchenden Raum wird durch eine Pistole ein einziger Schallstoß von möglichst kurzer Dauer erzeugt und der dadurch hervorgerufene Schallverlauf oszillographiert.

Von der Schallquelle geht dann eine einzige Druckwelle aus, die von den Wänden und der Decke des Raumes nacheinander in Zeitabständen, die den Entfernung der reflektierenden Flächen von der Schallquelle entsprechen, zurückgeworfen werden. Aus den Laufzeiten zwischen dem Zeitpunkt des Knalls und dem Eintreffen einer Reflexion kann man den Weg des Schalles und die Lage der reflektierenden Flächen bestimmen, während die Größe der Reflexion und die Zeit ihres Eintreffens nach dem direkten Schall auf ihren Einfluß auf die Hörsamkeit schließen läßt.

Die Flobertpistole von 6 mm Kaliber, die wir zur Erzeugung des Schallstoßes benutzten, wurde mit Rundkugelpatronen, aus denen das Geschoß entfernt war, geladen. Die Versuche ergaben, daß die Druckamplitude dieses Knalles überraschend konstant, ja innerhalb der Meßgenauigkeit identisch war.

Die *Stoßprüfung* findet ihre Ergänzung in der zweiten Untersuchungsmethode: der *Tonprüfung*, bei der Schwingungsgruppen von bestimmter Tonhöhe in dem zu untersuchenden Raume erzeugt werden.

Während bei der *Stoßprüfung* die Schallerregungszeit kurz ist gegenüber der Laufzeit der Schallwellen bis zu den reflek-

1) Die Methoden sind natürlich dem Prinzip nach nicht neu.

tierenden Flächen, dauert die Erregung durch Töne so lange, daß auf das Mikrophon unter Umständen direkter Schall und Reflexionen gleichzeitig auftreffen. Man erkennt daher aus der ersten Methode (Stoßprüfung) die Reihenfolge und Stärke der einzelnen Rückwürfe, während die Tonprüfung das Resultat der Überlagerung verschiedener Schallwellen ergibt.

Als Schallquelle für die Tonprüfung diente der oben beschriebene Lautsprecher, der von einem Röhrengenerator erregt wurde. Der Röhrengenerator war in der üblichen Schaltung mit induktiver Rückkoppelung geschaltet. Während die Kapazität stufenweise geändert wurde, konnte die Selbstinduktion des Schwingungskreises durch Verschieben zweier Spulen auf einem offenen Eisenkern kontinuierlich variiert werden. Ebenso ließ sich durch Verschieben die Rückkopplung des Senders und die induktive Ankoppelung des Lautsprechers regeln.

Durch eine rotierende Kurzschlußvorrichtung wurde der Lautsprecher periodisch kurzgeschlossen, so daß abwechselnd Schallseiten und Schallpausen aufeinander folgten.

Bei der großen Variationsmöglichkeit dieser Methode durch Änderung der Schallzeiten und Schallpausen, der Tonhöhe und der Aufstellung der Geräte mußten wir uns auf einige Fälle beschränken.

So behielten wir z. B. die Dauer einer Schallunterbrechungsperiode, d. h. einer Schallzeit mit der darauffolgenden Pause zu etwa 0,5 Sek. bei allen untersuchten Räumen bei, um die Figuren miteinander vergleichen zu können. In stark gedämpften Räumen, wie den Rundfunksenderäumen, wäre eine Verkürzung dieser Periode möglich gewesen, während in anderen Räumen die Schallschwingungen des letzten Tones noch längst nicht abgeklungen waren und sich mit dem neu einsetzenden Ton vermischteten.

Ein Teil der Diagramme wurde mit einer Schalldauer von etwa 0,1 Sek. und 0,4 Sek. Pause aufgenommen, während bei den anderen der Lautsprecher 0,3 Sek. tönte und nur 0,2 Sek. schwieg.

Der Frequenzeinfluß wurde in mehreren Räumen untersucht. Es zeigte sich aber, daß er in Räumen, in denen keine ausgesprochenen Resonanztöne auftraten, in dem von uns be-

nutzten Frequenzgebiet gering war. In Räumen mit Eigen-
tönen, wie z. B. der untersuchten Eingangshalle der Technischen
Hochschule¹⁾, ist der Einfluß der Frequenz natürlich sehr groß.

Wir beschränkten uns daher bei den meisten Aufnahmen
auf eine mittlere Periodenzahl von rund 500/Sek.

Bei der Aufstellung der Geräte nahmen wir vor allem
Rücksicht auf den Verwendungszweck des zu untersuchenden
Raumes.

III. Prüfung des Meßverfahrens

Wir prüften unser Meßgerät und die Methoden auf dem
freien Dach, indem wir dort eine Reihe von akustischen Ver-
suchen oszillographierten.

Zunächst nahmen wir das Bild des Pistolenknalls²⁾ mit
verschiedenen Empfängern auf. Die Pistole wurde auf dem
Boden aufgestellt. Geschossen wurde bei diesen Aufnahmen
senkrecht in die Höhe. Das Aufnahmegerät — Reißmikrophon
oder Telephon — stand unmittelbar neben der Pistole.

Mit der oben beschriebenen Meßanordnung von Fig. 8
S. 136 erhielten wir das Knallbild Fig. 13.³⁾ Die Kurve t der
Figur ist der Strom einer elektromagnetisch erregten Stimm-
gabel von 32/Sek., der auf allen Oszillogrammen als Zeit-
markierung verwendet wurde. Der Kurvenzug a ist die oszillo-
graphische Mikrophonaufzeichnung.

Das Knallbild besteht aus einer einzigen sehr steil an-
steigenden und ebenso schnell wieder abfallenden Druckhalb-
welle von etwa $1/_{250}$ Sek., der eine weniger scharfe Verdünnungs-
halbwelle von bedeutend längerer Zeitdauer folgt.

Wie leicht Verzerrungen der Kurvenform eintreten können,
sieht man aus Fig. 14. Das Reißmikrophon wurde dabei in
einer üblichen, aber für den vorliegenden Zweck ungeeigneten
Schaltung mit einem Transformator und einer Kapazität ver-
wandt, die bei kontinuierlichen Schallvorgängen gute Resul-
tate gab. Im Knaaldiagramm zeigen sich jedoch Schwingungen,

1) Vgl. die folgende Arbeit von E. Scharstein, Ann. d. Phys. [5]
2. S. 163. 1929.

2) H. Geiger u. K. Scheel, Über den Knall. Handb. d. Physik
8. S. 633 ff. 1927; dort auch Literaturangaben.

3) Die wiedergegebenen Oszillogramme befinden sich im Anhang
der Arbeit.

die von der im Eingangskreis liegenden Selbstinduktion und Kapazität herrühren und die Kurvenform stark verzerren.

Telephone sind für die Aufnahme von stoßweisen Schallvorgängen gänzlich ungeeignet. Fig. 15 zeigt die Aufnahme mit einer Lautsprecherdose. Bei Fig. 16 wurde ein Kopfhörer-telephon benutzt. Beide Aufnahmen haben prinzipiell den gleichen Verlauf. Die Membrane werden durch den Schuß in ihrer Eigenschwingungszahl angestoßen und schwingen gedämpft aus. Die Eigenschwingungszahl der Lautsprechermembran beträgt $f_0 = 512/\text{Sek.}$, die der leichten Kopfhörer-membran liegt viel höher bei $f_0 = 1280/\text{Sek.}$.

Wenn man das Reißmikrophon in der Meßschaltung Fig. 8, S. 136 in 3 m Entfernung von der Pistole auf dem Boden aufstellt und flach über den Boden in der Richtung auf dasselbe schießt, wird das Knallbild schon verzerrt (Fig. 17). Auffallend an diesem Diagramm ist, daß der Knall mit einer sehr kurzen Verdünnungshalbwelle von etwa $1/750$ Sek. ankommt. Eine solche Verdünnungshalbwelle wurde öfter bei Knallbildern beobachtet. Bei horizontalem Schuß aus größerer Entfernung ergeben sich immer mehrere Druckmaxima, die durch den Einfluß des Bodens hervorgerufen werden und verschwinden bei einem Schuß senkrecht in die Höhe. Die lange Verdünnungshalbwelle verflacht sehr schnell mit der Entfernung, während die Druckhalbwelle besser erhalten bleibt.

Stand das Mikrophon, wie in diesem Falle nicht direkt bei der Pistole, so diente zur Festlegung des Schußzeitpunktes und zur Errechnung der Schallaufzeit die Aufzeichnung eines Postmikrophons, die auf den Figuren mit *b* bezeichnet ist.

Die beiden Figuren 18 und 19 zeigen einen Reflexionsversuch und dessen Dämpfung. — In 1,40 m Höhe über dem Erdboden wurden Pistole und Mikrophon nebeneinander aufgestellt. Senkrecht darunter lag eine Eisenblechplatte, auf die die Pistole gerichtet wurde. Auf der Fig. 18 sieht man die starke Reflexion der Platte (1). Bedeckt man dieselbe dagegen mit schalldämpfendem Baumwollstoff (sogenanntem Molton), der mehrfach in lockeren Falten darüber ausgebreitet wurde, so erhielt man Fig. 19, auf dem eine Bodenreflexion nicht mehr zu erkennen war (1).

Der Eindruck, den ein Knall auf unser Ohr ausübt, wird sehr stark beeinflußt durch die Umgebung der Schußstelle. Der Knall der gleichen Pistole klingt einmal hell, das andere Mal dumpf. Dabei bleibt die physikalische Schwingungsform des Knalls in ihrer Grundform durchaus erhalten. Sie behält den Charakter der Explosionswelle mit Verdichtungs- und Verdünnungshalbwelle. Über diese Explosionswelle überlagert sich aber durch den Einfluß der Umgebung eine Feinstruktur von höherer Periodenzahl, die trotz ihrer geringeren Amplitude für den physiologischen Klang des Schusses, wie ihn das Ohr aufnimmt, von ausschlaggebender Bedeutung ist. Das zeigt das Oszillrogramm Fig. 20, bei dem die Pistole in einem Ofenrohr von 1,6 m Länge und 0,12 m Durchmesser abgefeuert wurde (vgl. damit Fig. 18). Der Knall war für das Ohr tief und dumpf.

Die letzte Fig. 21 zeigt ein Bild der Tonprüfung, bei dem der Lautsprecher und das Mikrophon auf dem Boden des Daches standen. Die mit t bezeichnete Kurve ist wieder die Zeitmarkierung von $1/32$ Sek., Kurve *b* gibt den Lautsprecherstrom und damit die Einschalt- und Kurzschlußzeiten des Lautsprechers wieder. *a* ist die oszillographische Aufzeichnung der Mikrophonspannung. Der von uns benutzte Lautsprecher war schwach gedämpft; die dadurch hervorgerufenen Einschwingvorgänge kann man in der Mikrophonkurve gut erkennen. Die Mikrophonaufzeichnung ist ein getreues Abbild des Lautsprechertones ohne Reflexionen und Nachhall. Die Kurvenform änderte sich auch nicht bei größerer Entfernung des Mikrophons von der Schallquelle.

IV. Die Untersuchung von Räumen

A. Die Rundfunksenderäume

Von besonderem Interesse sind akustische Untersuchungen, bei denen zur Schallaufnahme ein Mikrophon benutzt wird in Räumen, die für mikrofonische Übertragungen bestimmt sind, wie z. B. in Rundfunksenderäumen.

Für derartige Räume ist die Forderung aufzustellen, daß die Druckamplitude von Reflexionen, die soviel später als der

direkte Schall auf das Mikrophon treffen, daß sie vom Ohr zeitlich getrennt werden, viel schwächer sein sollen als die Amplitude des direkten Schalles. Um eine naturgetreue Wiedergabe einer Schallquelle zu erreichen, muß man also die Reflexionen unter Umständen vollkommen oder nahezu vollkommen unterdrücken.

Auf den Klangcharakter der Musik übt aber die Akustik des Konzertsaales einen entscheidenden Einfluß aus. Wird die Raumwirkung bei Musikübertragungen unterdrückt, so klingt die Musik unnatürlich leer und tot. In Musiksälen ist eine zu starke Dämpfung daher nicht günstig. Ein Mindestmaß für die Dämpfung ist aber durch die obige Forderung gegeben.

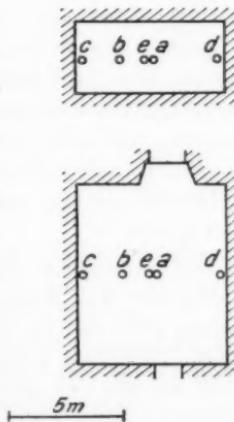
1. Der kleine Senderaum

Der Münchener Rundfunkssender hat zwei Senderäume. Der kleine Senderaum ist in erster Linie für Vorträge und Nachrichtenübermittlung gedacht, während der große für die Übertragung von Konzerten bestimmt ist.

Fig. 10 zeigt den Grund- und Seitenriß des kleinen Senderaumes. Der Raum ist durch Verhängen der Wände und Decke und durch Beladen des Bodens mit Teppich stark gedämpft. In die Figur sind die Aufstellungspunkte unserer Meßgeräte eingetragen.

Bei den folgenden Schußfiguren sind einzelne Stellen mit Zahlen gekennzeichnet. Es bedeutet bei allen Figuren (0) den Zeitpunkt des Schusses und (1) den direkten Schall. Die mit weiteren Zahlen versehenen Druckamplituden bedeuten Reflexionen, die bei der Erklärung der einzelnen Figuren genauer angegeben sind.

Wir wählten bei unseren Versuchen zuerst die Aufstellung, die bei Vorträgen im Rundfunk üblich ist. Das Mikrophon stand dabei in der Mitte des Raumes (Stelle *b* in Fig. 10),



Der kleine Senderaum

Fig. 10

1,50 m von der vortragenden Person entfernt (Fig. 10 a). Der Abstand der Schallquelle vom Mikrofon war also verhältnismäßig gering.

Bei der Fig. 22 a wurde in Richtung auf das Mikrofon geschossen. Das Knallbild ist viel komplizierter als im Freien, aber es zeigt sich doch die starke Dämpfung des Raumes: die Druckamplituden nehmen sehr schnell ab. Gut zu unterscheiden sind die ersten Rückwürfe von Boden und Decke (2) und die besonders starke Reflexion der hinter dem Mikrofon befindlichen Längswand — der Vorderwand — (3). Bei der Beurteilung der Schuß- und Tonprüfungsfiguren ist der Zeitmaßstab zu beachten. Um bei der Stoßprüfung die einzelnen Reflexionen voneinander trennen zu können, ist der Zeitmaßstab sehr stark auseinandergezogen. Das Ohr vermag tatsächlich direkten Schall und Reflexionen im kleinen Senderaum nicht zu trennen; das Schußbild ist für das Ohr ein einziger kurzer Knall.

Die Oszillogramme Figg. 23—25 geben Tonprüfungen bei der gleichen Aufstellung wieder. Figg. 23 und 24 wurden bei der Frequenz 450/Sek. aufgenommen, Fig. 25 bei 980/Sek. Alle drei Figuren zeigen eine sehr gute Übereinstimmung des Lautsprecherstromes und der Mikrophonaufzeichnung. Anfall und Nachhall sind sehr kurz und von geringer Amplitude. Es ergibt sich also eine naturgetreue Wiedergabe des Tones der Schallquelle.

Bei der zweiten Aufstellung wurde der Abstand zwischen Schallquelle und Mikrofon vergrößert, um den Einfluß des Raumes mehr zur Geltung zu bringen. Das Mikrofon wurde in die Mitte einer Längswand des Raumes gestellt an einen Platz, an dem es auch bei Rundfunksendungen aus diesem Raum oft steht (Fig. 10 c). Die Schallquelle stand einmal in der Mitte des Raumes bei e, das andere Mal an der dem Mikrofon gegenüberliegenden Wand bei d.

Bei dem Knallbild Fig. 26 wurde in der Mitte des Raumes geschossen (Fig. 10 e). Der Nachhall dauert länger als bei Fig. 22. Auf dem Oszillogramm ist sogar der zweite Rückwurf der dem Mikrofon gegenüberliegenden Wand zu sehen (5 in Fig. 26).

In den vier folgenden Figuren ist für eine Periodenzahl von 460/Sek. der Lautsprecherschall mit langen und kurzen Unterbrechungspausen wiedergegeben. Bei Figg. 27 und 28 stand der Lautsprecher bei *e*, bei Figg. 29 und 30 bei *d*. Der Einfluß des Raumes ist stärker zu bemerken auf diesen Figuren als auf denen, die bei der ersten Aufstellung der Meßgeräte gemacht wurden. Am stärksten ist der Nachhall auf den Figg. 27 und 28, bei denen der Lautsprecher in der Mitte des Raumes stand, obwohl die Entfernung von der Schallquelle zum Mikrophon geringer war als bei den Oszillogrammen Figg. 29 und 30, bei denen der Lautsprecher an der dem Mikrophon gegenüberliegenden Wand aufgestellt war.

Der Nachhall dauert ungefähr $1/16$ Sek., ist also immer noch als sehr kurz zu bezeichnen. Ein Verwischen der einzelnen Schallzeichen durch Überlagerung der Druckamplituden zweier aufeinanderfolgender Schallperioden trat niemals ein.

Auch bei dieser Aufstellung wird der von der Schallquelle erzeugte Ton noch gut wiedergegeben. Durch die Dämpfung des Raumes ist jeder stärkere Nachhall unterdrückt. Der Raum ist für eine verzerrungsfreie Wiedergabe der Sprache hervorragend geeignet. Kommt es aber mehr auf den Klangcharakter an wie bei Musik, so ist die starke Dämpfung ungeeignet. Der große Senderaum, der hauptsächlich für die Übertragungen von Konzerten und Sendespielen benutzt wird, ist daher viel weniger gedämpft.

2. Der große Senderaum

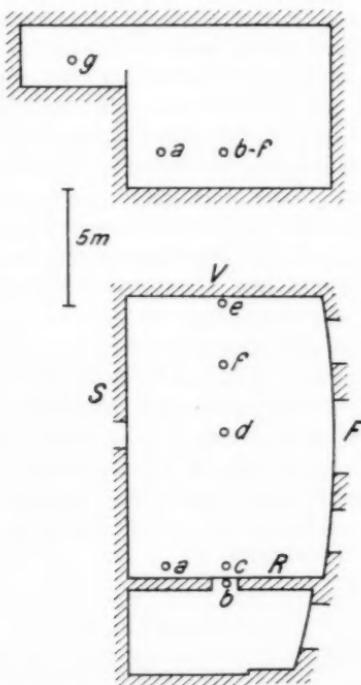
Fig. 11 gibt den Grund- und Seitenriß des großen Senderaumes wieder. In den Grundriß ist auch der an den großen Senderaum anschließende Büroraum eingezeichnet.¹⁾

Bei Rundfunksendungen stand das Mikrophon ursprünglich an der in Fig. 11 mit *a* bezeichneten Stelle. Es zeigte sich aber, daß es für die Übertragungen günstiger war, wenn man das Mikrophon an die Stelle *b* brachte und die Tür zu dem angrenzenden Büroraum öffnete, da durch den Nachhall des

1) Inzwischen wurde die Mauer zwischen dem Senderaum und dem Büro teilweise herausgebrochen.

schwach gedämpften Büros der Klangcharakter der Musik verbessert wurde.

Wir nahmen zuerst eine Reihe von Oszillogrammen auf, bei denen das Mikrofon bei *a* aufgestellt war, und untersuchten dann den Einfluß des Büraumes, in dem wir bei



Grund- und Seitenriß des großen Senderaumes

Fig. 11

gleicher Aufstellung der Schallquelle das Mikrofon einmal vor die geschlossene (*c*), das andere Mal in die offene Tür (*b*) stellten und das Klangbild oszillographierten.

Bei dem ersten Knallbild (Fig. 31) stand das Mikrofon an der Wand bei *a*. Geschossen wurde von der Mitte des Raumes (*d*) auf das Mikrofon zu. Die vielen Spitzen am

Anfang des Knallbildes kommen von den Reflexionen der Wand und den Gegenständen in der Nähe des Mikrofons. Die Rückwürfe vom Boden (2), Seitenwand (3), Fensterwand (4) und Decke (5) sind gut zu erkennen. Der auf die Saalvorderwand treffende Schall wird zur Rückwand reflektiert, kehrt nach $\frac{1}{20}$ Sek. Laufzeit wieder zum Mikrofon zurück (6), wird dann zum zweiten Mal zur Rückwand reflektiert und kommt noch einmal zum Mikrofon zurück (7). Die Amplitude des Knalls ist nicht so stark gedämpft wie im kleinen Senderaum.

Die beiden nächsten Knallbilder zeigen den Einfluß des Büroraumes. Geschossen wurde an der Rückwand des Sende-
raumes (Stelle *e*) in Richtung auf das Mikrofon, das bei Fig. 32 vor der geschlossenen Tür bei *c*, bei Fig. 33 in der offenen Tür bei *b* stand. Die beiden Figuren sind im wesentlichen gleich bis auf den Rückwurf der Bürowand (4 in Fig. 33).

Noch deutlicher zeigen diesen Unterschied die Figg. 34 bis 37, die mit Tönen aufgenommen wurden. Der Lautsprecher stand bei diesen Aufnahmen weit entfernt vom Mikrofon in der Mitte der Galerie (*g*). Direkter Schall konnte von der Schallquelle nicht zum Mikrofon gelangen. War das Mikrofon vor der geschlossenen Tür aufgestellt, so erhielten wir Fig. 34 ($f = 460/\text{Sek.}$ lange Pausen) und Fig. 35 ($f = 460/\text{Sek.}$ kurze Pausen). Die Mikrophonaufzeichnung ist hierbei längst kein Abbild des erzeugten Schalles mehr, läßt aber immer noch die Kurvenform desselben erkennen, während das Klangbild bei den Aufnahmen mit offenem Büror Raum stark verzerrt wird. Es wird von Interferenzen beherrscht und erhält daher ein zackiges Aussehen (Figg. 36 und 37).

Schon bei den Aufnahmen mit langen Unterbrechungs-
pausen füllt der Nachhall mit geringer Amplitude die ganze Pause aus. In weit stärkerem Maß ist das bei den Figuren mit kurzen Schallpausen der Fall.

Auch bei allen anderen Aufstellungen der Schallquelle zeigte sich diese Komplizierung des Klangbildes durch den Einfluß des Büroraumes. Wenn Rundfunkübertragungen mit der Mikrophonaufstellung bei *b* und offener Bürotür trotzdem besser

klingen, so sind diese Figuren ein Beweis dafür, daß das menschliche Ohr bei Musikvorträgen den Raumeinfluß, der ein ineinanderfließen der einzelnen Töne und damit eine Mischung der erzeugten Klänge hervorruft, als angenehm empfindet.

Den Einfluß der Tonhöhe auf die Schwingungsform zeigt die nächste Reihe von Figuren (38—43).

Die Amplituden dieser Oszillogramme sind nicht miteinander vergleichbar, da die von der Schallquelle bei den verschiedenen Periodenzahlen abgegebene Schalleistung nicht gleich war und das Reißmikrophon frequenzabhängig ist.

Der Lautsprecher stand weit entfernt vom Mikrophon bei *f*, das Mikrophon bei *c* vor der geschlossenen Tür. Die Figuren wurden aufgenommen mit kurzen und langen Schallzeiten und zwar bei:

$$\begin{aligned}f &= 177/\text{Sek.}, \text{ Figg. 38 und 39,} \\f &= 460/\text{Sek.}, \text{ Figg. 40 und 41,} \\f &= 980/\text{Sek.}, \text{ Figg. 42 und 43.}\end{aligned}$$

Die Oszillogramme zeigen, daß der Verlauf des Klangbildes in seinen Einzelheiten von der Periodenzahl stark abhängt, daß aber der Charakter des Oszillogramms in seinen wesentlichen Zügen erhalten bleibt. Die Dämpfung wird stärker mit steigender Frequenz des erzeugten Schalles.

Die Dämpfung ist bei allen Figuren so stark, daß ein Verwischen der einzelnen Schallzeichen nicht eintritt. Auch beim Abhören mit einem Telephon hinter dem Verstärker waren die Schallzeichen deutlich zu unterscheiden, während sie bei den Figuren, die mit offener Bürotür aufgenommen wurden, schon unklarer waren.

Betrachtet man die klanggetreue Wiedergabe der Schallquelle durch die Mikrophonaufzeichnung als ein Maß für die Güte der Akustik eines Raumes, so sind die beiden Rundfunksenderäume als sehr gut zu bezeichnen.

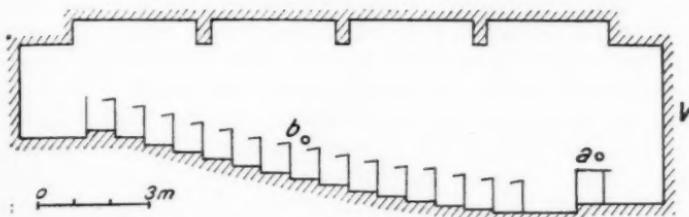
B. Der kleine Physikhörsaal

Zum Schluß soll nun noch über die Versuchsergebnisse, die wir bei der Untersuchung eines normalen, großen Raumes erhielten, berichtet werden.

Der kleine Physikhörsaal ist ein langer, niederer Raum mit kassettierter Decke.

Fig. 12 zeigt den Querschnitt durch den Saal. Die Akustik des Raumes ist gut, so daß die Sprache leicht verständlich ist.

Gesprochen wird in einem Hörsaal meistens hinter der Mitte des Experimentierstisches. Wir stellten daher auch bei unseren Versuchen die Schallquelle über dem Experimentierstisch bei α in Fig. 12 auf, während das Mikrofon in der



Querschnitt durch den kleinen Physikhörsaal

Fig. 12

Mitte des Raumes in Kopfhöhe einer sitzenden Person (Fig. 12 b) stand.

Ein Schuß in dem Raum hat für das Ohr einen hellen Klang und verklingt sehr rasch. Auch das aufgenommene Knallbild zeigt keine Besonderheiten (Fig. 44). Starke Reflexionen treten in der Figur nicht auf. Schon nach $1/33$ Sek. ist die Amplitude des Knalls sehr stark vermindert.

Viel verwickelter liegen die Verhältnisse bei der Tonprüfung. Selbst in einem Raum, der im Knallbild verhältnismäßig geringe Reflexionen aufweist, zeigt die Mikrofonaufzeichnung einer Tonfolge der Frequenz 493/Sek. schon einen sehr komplizierten Verlauf (Fig. 45). Der Schallvorgang ist in $1/2$ Sek. noch nicht abgelaufen. Es treffen daher gleichzeitig auf das Mikrofon der Nachhall eines Tones und der Anhall des folgenden. Da bei jedem neuen Ton die Phasenverschiebung eine andere sein kann, werden sich die Gruppen

im allgemeinen nicht gleichen, so daß das Aussehen der Figur von Periode zu Periode wechselt.

Wie sehr eine geringe Änderung der Frequenz das Klangbild beeinflussen kann, zeigt ein Vergleich der letzten Figur mit der folgenden: Fig. 46. Die Frequenz wurde hierbei von 493 auf 453/Sek., das ist um etwa 8 Proz., herabgesetzt. Bei 453/Sek. sind die Gruppen viel geschlossener und klarer. Beim Nachhallen tritt nach etwa 0,2 Sek. ein Echo auf, das auch mit dem Ohr direkt zu hören war.

Schon eine geringe Frequenzänderung kann also den Charakter des Klangbildes an einer bestimmten Stelle sehr verändern. Das schließt nicht aus, daß unter Umständen und an bestimmten Stellen des Raumes eine sehr starke Änderung der Frequenz z. B. auf das Doppelte oder die Hälfte keinen großen Einfluß auf die Schwingungsform ausübt. Beispiele dafür sind die Fig. 47 mit 1070/Sek. und Fig. 48 mit 225/Sek. Beide Figuren zeigen in großen Zügen den gleichen Verlauf wie Fig. 46. Die absolute Tonhöhe ist eben nicht so sehr maßgebend für das Klangbild als der Umstand, ob die Meßfrequenz nahe bei einer Resonanzfrequenz des Raumes liegt, die den ganzen Raum zum Schwingen anregt oder nicht.

Es lag die Vermutung nahe, daß die ungegliederte Vorderwand (V in Fig. 12) auf die akustischen Eigenschaften des Raumes einen großen Einfluß hat. Um nun den Einfluß dieser Wand festzustellen, wurde sie mit Molton verhängt und die Figuren mit den Frequenzen 493 und 453/Sek. im gedämpften Raum wiederholt.

(Fig. 49 $f = 493/\text{Sek.}$ zum Vergleich mit Fig. 45.)

(Fig. 50 $f = 453/\text{Sek.}$ zum Vergleich mit Fig. 46.)

Besonders bei den Figg. 46 und 50 sieht man sehr gut, daß durch die Dämpfung alle Amplituden annähernd proportional verringert worden sind, daß sich der Charakter der Kurven aber nicht geändert hat.

Prüfung des Meßverfahrens auf dem Dach

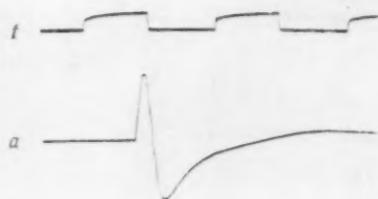


Fig. 13

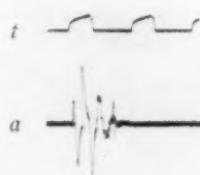


Fig. 14

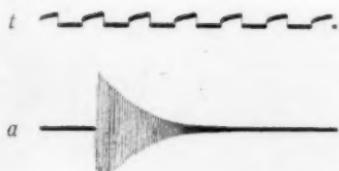


Fig. 15

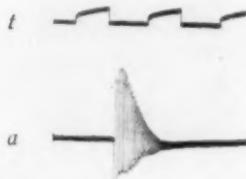


Fig. 16

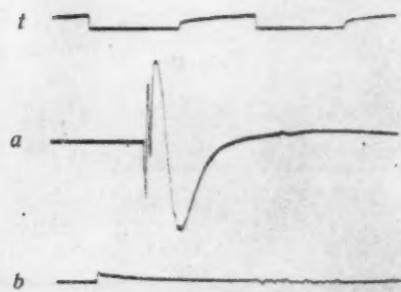


Fig. 17

Prüfung des Meßverfahrens auf dem Dach

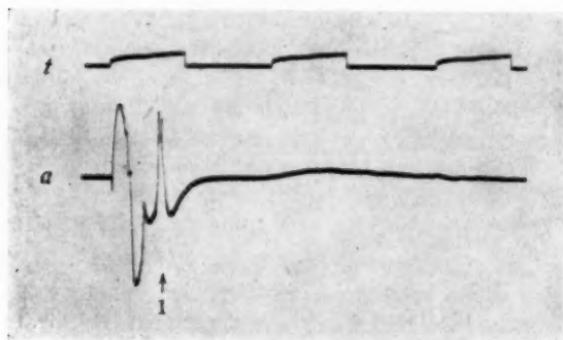


Fig. 18

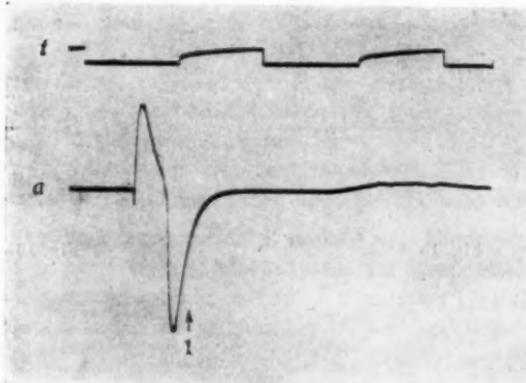


Fig. 19

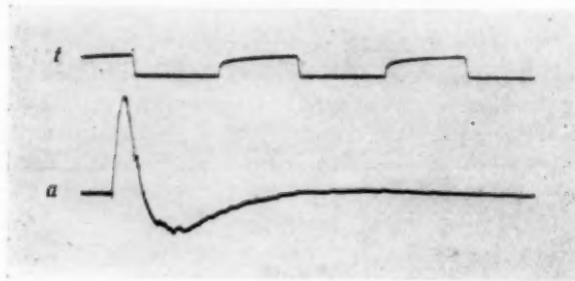


Fig. 20

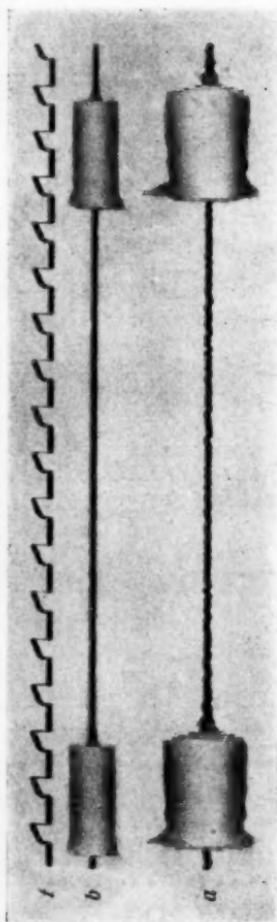
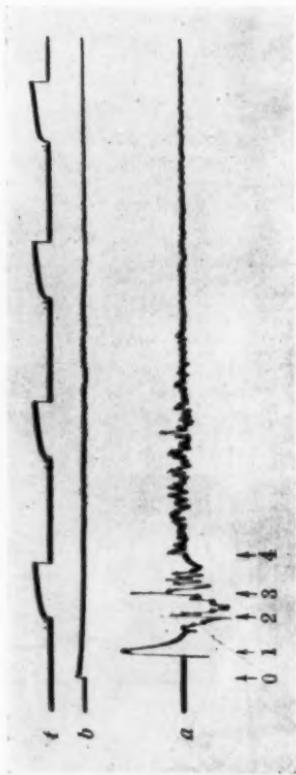


Fig. 21

Der kleine Rundfunkraum



2: Boden und Decke, 3: Vorderwand, 4: Seitenwände

Fig. 22

Der kleine Rundfunksenderaum

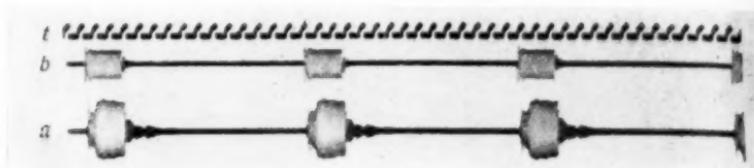


Fig. 23

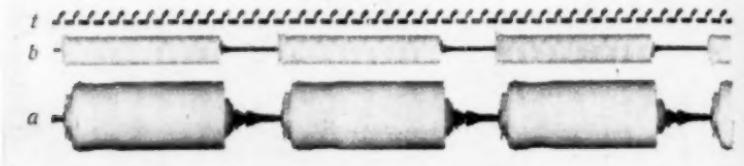
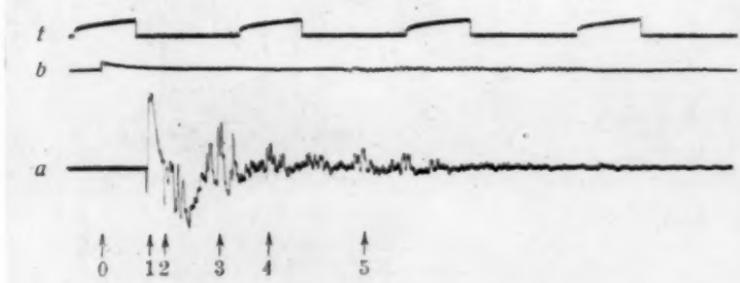


Fig. 24



Fig. 25



2: Boden, 3: Seitenwände, 4: Rückwand, 5: 2 mal Rückwand

Fig. 26

Der kleine Rundfunksenderaum

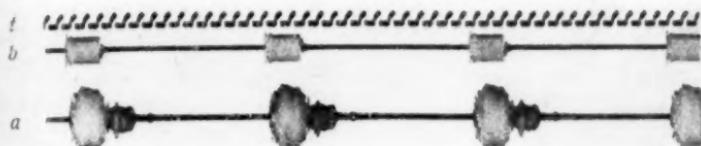


Fig. 27

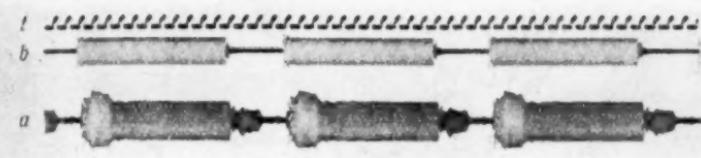


Fig. 28

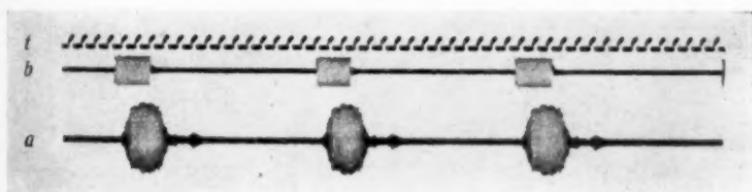


Fig. 29

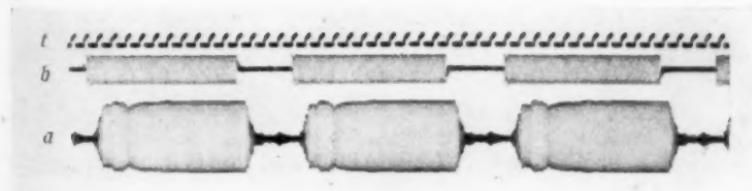
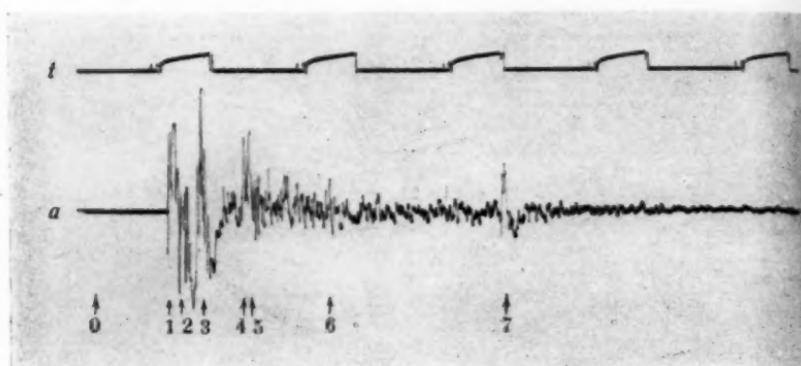


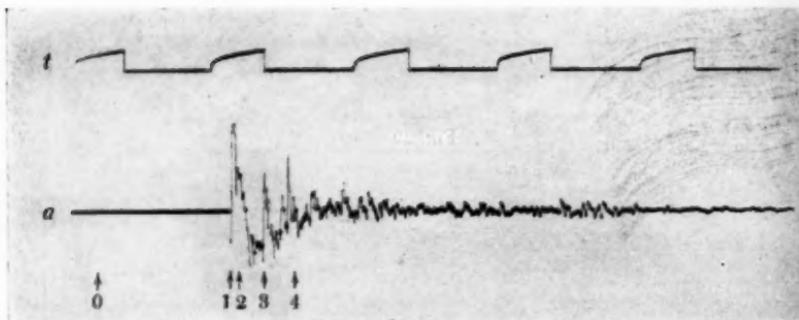
Fig. 30

Der große Rundfunksenderaum



2: Boden	5: Decke
3: rechte Seitenwand	6: Rückwand
4: Fensterwand	7: 2 mal Rückwand

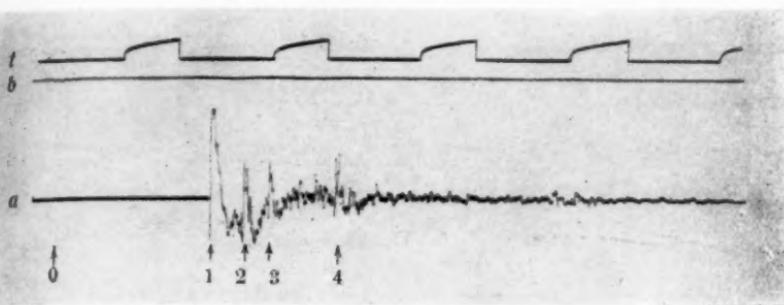
Fig. 31



2: Boden, 3: Seitenwände, 4: Decke

Fig. 32

Der große Rundfunkssenderaum



2: Seitenwände, 3: Decke, 4: Bürowand

Fig. 33

Einfluß des Bürraumes

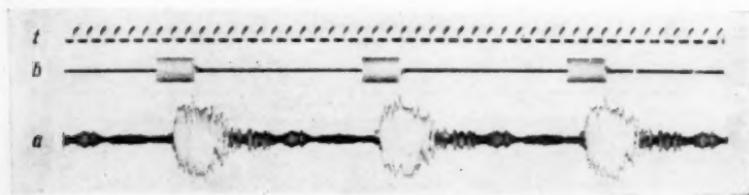


Fig. 34

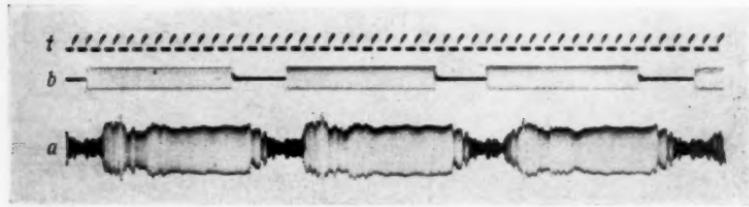


Fig. 35

Der große Rundfunksenderaum
Einfluß des Büorraumes



Fig. 36

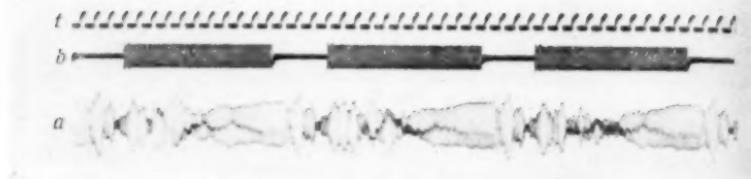


Fig. 37

Frequenzeinfluß

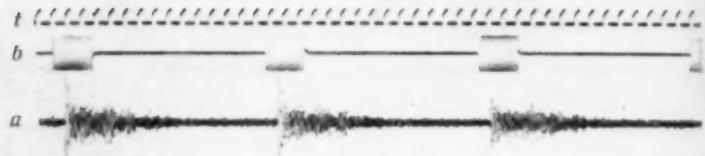


Fig. 38

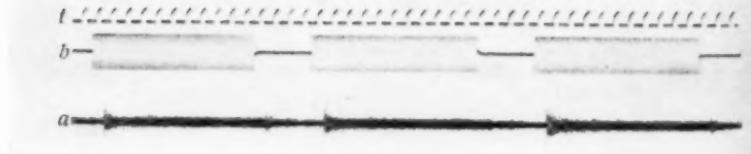


Fig. 39

Der große Rundfunk senderaum
Frequenzeinfluß

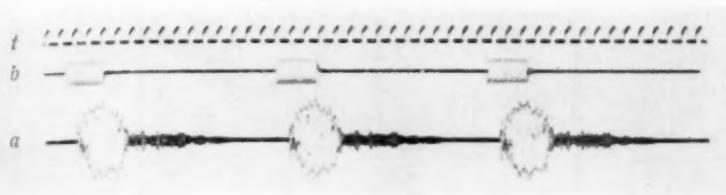


Fig. 40

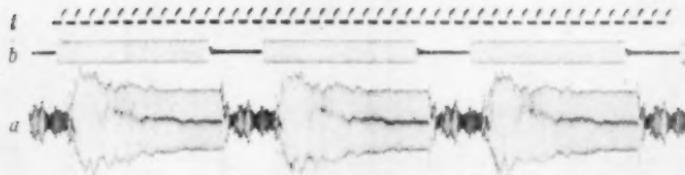


Fig. 41

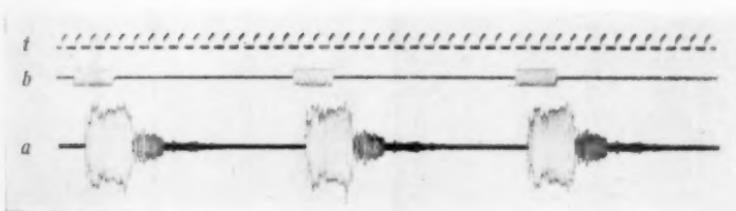


Fig. 42

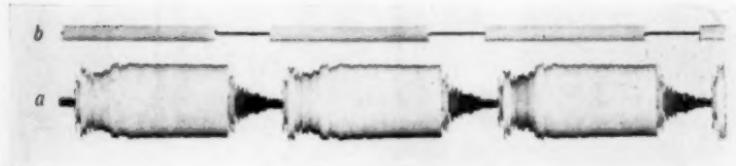


Fig. 43

Der kleine Physikhörsaal

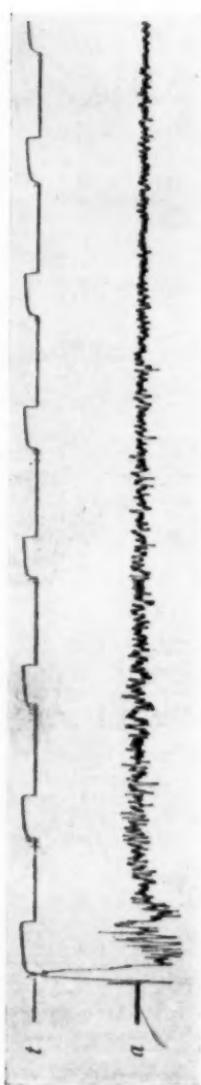


Fig. 44



Fig. 45



Fig. 46

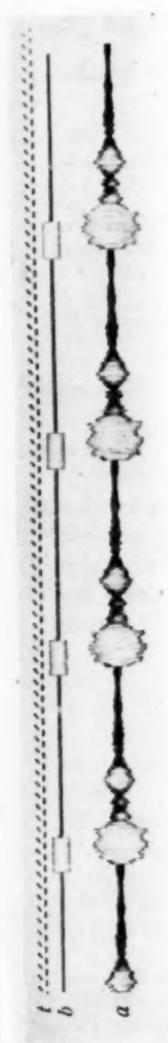


Fig. 46

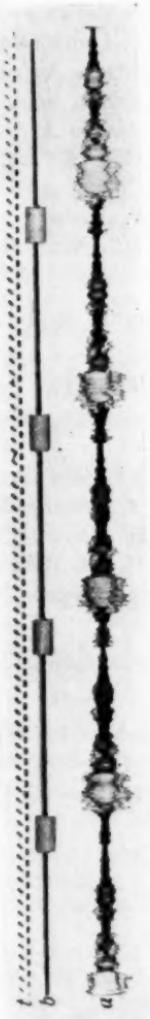


Fig. 47



Fig. 48

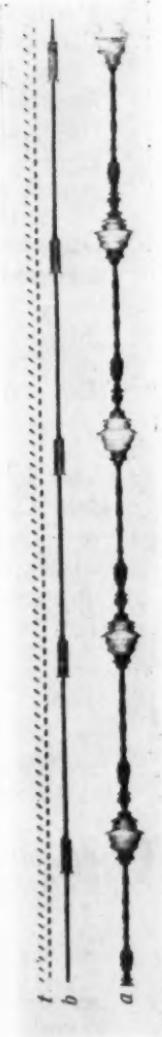


Fig. 49

Fig. 50

Zusammenfassung

1. Es werden oszillographische Methoden zur akustischen Untersuchung von Räumen entwickelt und zwar

a) die Stoßprüfung: oszillographische Aufnahme der Schalldruckkurve eines im Raum abgefeuerten Schusses;

b) die Tonprüfung: oszillographische Aufnahme von Tongruppen, die von einem Lautsprecher mit Unterbrecher ausgesandt werden.

2. Diese Methoden werden auf akustisch einfache Räume, insbesondere die Senderäume des Münchener Rundfunksenders angewandt.

München, Physikalisches Institut der Technischen Hochschule.

(Eingegangen 8. April 1929)

Beiträge zur Raumakustik¹⁾**Von Ernst Scharstein**

(Mit 41 Figuren)

Die folgenden Untersuchungen schließen sich an die Beiträge zur Raumakustik von W. Schindelin an.²⁾ Mit den Apparaten und Methoden, die von W. Schindelin beschrieben und im Freien und in einigen Räumen mit guter Akustik angewandt wurden, wurden Untersuchungen in normalen und schwach gedämpften Räumen der Technischen Hochschule ausgeführt.

Der erste Teil enthält Messungen in einer akustisch sehr merkwürdigen Eingangshalle. Im zweiten Teil folgt die Untersuchung eines schwach gedämpften Sitzungszimmers. Der dritte Teil behandelt die Akustik des großen Physikhörsaals. Am Schluß sind einige allgemeine Gesichtspunkte zusammengestellt.

I. Eingangshalle an der Luisenstraße**a) Die Form der Halle**

An der Südwestecke der Technischen Hochschule befindet sich eine Eingangshalle, deren Decke von einer Kugelfläche gebildet wird, während der Boden aus gut reflektierendem

1) Gekürzte Doktordissertation d. Technischen Hochschule München. Eingereicht am 18. April 1928. — Die Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Techn. Hochschule in gemeinsamer Arbeit mit W. Schindelin ausgeführt.

Hrn. Prof. Dr. J. Zenneck bin ich sowohl für die Anregung hierzu, wie auch für ständige Beratung zu großem Dank verpflichtet.

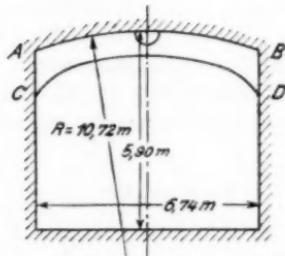
Die zu den Untersuchungen benutzten Apparate wurden uns zum Teil von der Helmholtz-Gesellschaft, zum Teil von der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft überlassen. Dafür möchte ich auch an dieser Stelle den verbindlichsten Dank aussprechen.

2) W. Schindelin, Ann. d. Phys. [5] 2. S. 129. 1929.

Steinpflaster besteht. In dieser Halle fallen die schlechten akustischen Eigenschaften, eine außerordentlich große Nachhallzeit und das Vorhandensein von Eigenfrequenzen und deren Resonanz, sehr stark auf.

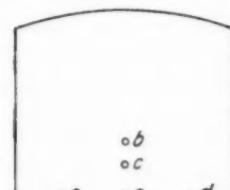
Fig. 1 zeigt einen Querschnitt der Halle. Der Raum ist nicht sehr groß, der Grundriß ist fast quadratisch mit einer Seitenlänge von etwa 6,70 m. Die Höhe beträgt in der Mitte 5,90 m, der Rauminhalt etwa 250 m³. Nach der einen Seite, die zum Treppenhaus hinführt, ist die Halle vollkommen offen.

Die kugelförmige Decke bildet einen sphärischen Spiegel, dessen gesetzmäßige Reflexionen nur durch die Wandkappen, d. h. die Ab rundungsf lächen, mit denen die

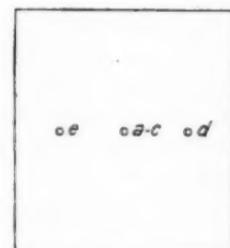


Querschnitt der Eingangshalle

Fig. 1



Aufriss



Grundriß
Aufstellungsplan

Fig. 2

Decke in die Seitenwände übergeht, gestört werden. Diese Wandkappen projizieren sich in Fig. 1 als Fläche ABCD.

Wir nahmen bei verschiedenen Aufstellungen der Meßgeräte Knallbilder auf und verfolgten außerdem den Weg der Schallstrahlen zeichnerisch mit Hilfe der Baupläne. Die erhaltenen Knallbilder ließen sich nach den Zeichnungen genau erklären, ein Beweis dafür, daß die Stoßprüfung von Räumen zur Verfolgung des Weges einzelner Schallstrahlen gut geeignet ist.

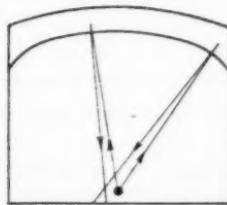
Scharf zu trennen ist in den Figuren zwischen der Wirkung der Mittelstrahlen, das heißt der Schallstrahlen, die auf die eigentliche Kugelfläche mit dem Radius von 10,70 m treffen und dem Einfluß der Strahlen, die von den Wandkappen reflektiert werden. Letztere sind im folgenden mit Randstrahlen bezeichnet. Da diese Abrundungsfächen teilweise Krümmungsradien von etwa 6,50 m haben, ihr Krümmungsmittelpunkt also auf dem Boden liegt, werden Schallwellen, die vom Boden auf sie treffen, nach der Reflexion wieder in der Nähe des Bodens vereinigt. Die Reflexionen an den Seitenwänden spielen keine wesentliche Rolle.

In Fig. 2 sind in Grund- und Aufriß alle vorkommenden Aufstellungen der Geräte eingezeichnet und mit Buchstaben versehen. Durch diese ist dann bei den Figuren der Platz von Pistole und Mikrofon gekennzeichnet.

b) Die Stoßprüfung

Bei dem ersten Diagramm, Fig. 8, waren Mikrofon und Pistole dicht nebeneinander in der Mitte des Raumes am Fußboden aufgestellt (in Punkt *a*, Fig. 2). Geschossen wurde senkrecht nach oben. Man sieht in der Fig. 8 als Kurvenzug *t* die Stromkurve eines Stimmgabel-Unterbrechers von 32 Perioden pro Sekunde zur Markierung des Zeitverlaufes. Kurve *a* stellt die oszillographische Mikrophonaufzeichnung dar.

Die Pistole befand sich etwas höher als das Mikrofon, so daß infolge der Richtwirkung der Pistole der direkte Knall (0) mit verhältnismäßig kleiner Amplitude aufgezeichnet wurde. (Die eingeklammerten Zahlen verweisen auf die mit der gleichen Nummer versehenen Stellen der Figuren.) In Fig. 3 ist der Verlauf zweier Randstrahlen gezeichnet. Ein Randstrahl, der auf eine Wandkappe trifft, wird von ihr nach einer Weglänge von etwa 13 m zur Ausgangsstelle zurückgeworfen, dann am Boden reflektiert, geht zur gegenüberliegenden Wandkappe und kommt wieder zurück.

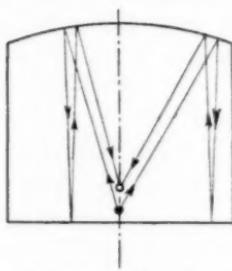


Verlauf der Randstrahlen

Fig. 3

Ein schräg nach oben gehender Mittelstrahl dagegen wird, wie in Fig. 4 wiedergegeben, wenn er die Kugelfläche trifft, von der Schallquelle wegreflektiert und kommt erst, nachdem er vom Boden wieder zur Decke geworfen, und von der Decke zum zweitenmal reflektiert worden ist, wieder zur Bodenmitte zurück.

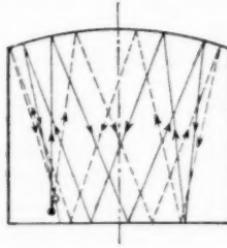
Dieser Schallverlauf zeigt sich sehr gut im Oszillogramm Fig. 8. Nach einer Laufstrecke von etwa 13 m sammeln sich die Randstrahlen beim Mikrofon und rufen dort die Druckamplitude (1) hervor. Nach der doppelten Strecke erkennt man die zweite Reflexion der Randstrahlen und gleichzeitig die erste der Mittelstrahlen (2). Der gleiche Vorgang wiederholt



Verlauf der Mittelstrahlen

• Pistole, ○ Schnittpunkt der Schallstrahlen

Fig. 4



Strahlenverlauf in der Eingangshalle

Fig. 5

sich dann noch einige Male. Jede Reflexion gerader Ordnungszahl tritt verstärkt auf, bis sich die Schallenergie allmählich zerstreut.

Auffallend an der Figur ist, daß das Knallbild aus einzelnen Druckwellen besteht, die durch längere Pausen getrennt sind, in denen die Schalldruckamplitude sehr gering ist. Dabei bleibt die Knallform auch in den Reflexionen sehr gut erhalten.

Bei dem Oszillogramm Fig. 8 waren Pistole und Mikrofon nahe am Boden aufgestellt, um ein möglichst übersichtliches Diagramm zu erhalten. Die Fig. 9 dagegen zeigt, wie das Bild sich ändert, wenn das Mikrofon 2 m über dem Boden aufgestellt wird (Fig. 2, Stelle b), während die Pistole sich wieder bei a befand. Der Sammelpunkt der Randstrahlen

liegt weit unterhalb des Mikrofons, daher zeigt sich in der Figur bei (1) eine geringere Amplitude. Es treten nur die Reflexionen der Mittelstrahlen deutlich hervor (2, 4, 6). Ihnen folgt jedesmal in kurzem Abstand ein Rückwurf des Bodens (3, 5, 7). Der Strahlenverlauf der Mittelstrahlen wird auch in diesem Falle durch Fig. 4 dargestellt.

Um festzustellen, wie sich der Raum verhält, wenn die Erregung nicht vom Mittelpunkte des Bodens ausgeht, wurden Pistole und Mikrofon 2 m aus der Mitte geschoben und wieder nebeneinander am Boden aufgestellt (Pistole und Mikrofon bei e in Fig. 2). Das so erhaltene Diagramm zeigt Fig. 10. Wie der Strahlenverlauf Fig. 5 erkennen läßt, werden die Schallstrahlen bei der ersten Deckenreflexion im ganzen Raum zerstreut, sammeln sich nach nochmaliger Reflexion an der Decke an einer Stelle des Bodens, die symmetrisch zur Pistole liegt, werden zurückgeworfen und kehren auf dem gleichen Weg zurück. Nach Zurücklegung eines Weges von etwa 46 m vereinigen sie sich in der Nähe des Mikrofons (4). Wenn der ganze Vorgang sich wiederholt hat, bekommt man nach der gleichen Zeit noch einmal eine Druckwelle bei (8).

Der Weg der Randstrahlen ist in diesem Falle sehr kompliziert. Ein Teil von ihnen wird auf die Seitenwände reflektiert. Ein anderer Teil wandert zweimal zwischen Boden und Decke hin und her. Sie sammeln sich nach 25 m Weglänge beim Mikrofon (2).

Da die Aufzeichnung der Schallstrahlen ergab, daß sich die Schallenergie im symmetrischen Punkt konzentriert, wurde das Mikrofon zur Kontrolle an dieser Stelle aufgestellt. Es befanden sich also die Pistole bei e , das Mikrofon bei d in Fig. 2, je 2 m von der Mitte entfernt. So erhielten wir Oszillogramm Fig. 11. Kurve c dieser Figur wurde mit einem Postmikrofon aufgenommen, das unmittelbar neben der Pistole stand; der erste Ausschlag dieser Kurve gibt also den Augenblick des Schusses an [Fig. 11 (x)]. Diese Postmikrofonaufzeichnung, die mit c bezeichnet wurde, wurde immer benutzt, wenn der Zeitpunkt des Schusses festgestellt werden sollte, ohne daß Pistole und Reißmikrofon am gleichen Ort standen. Bei (0) sieht man in der Reißmikrofonkurve den direkten Knall, bei (1) eine Reflexion der Randstrahlen und

bei (2) die erwartete Konzentration der Mittelstrahlen. Ein Vergleich dieses Diagramms mit Fig. 10 zeigt deutlich, wie sich der Schalldruck erst an der symmetrischen Stelle sammelt [Fig. 11 (2), zur Schußstelle zurückkehrt [Fig. 10 (4)] und dann noch einige Male hin und her pendelt:

Fig. 11 (6) symmetrischer Punkt,
 Fig. 10 (8) Schußstelle,
 Fig. 11 (10) symmetrischer Punkt.

Erst allmählich wird die Schallenergie zerstreut.

Wir haben bisher von einem symmetrischen Punkt am Boden gesprochen, in dem sich die Schallstrahlen sammeln. Das ist nicht genau richtig, der Sammelpunkt liegt in Wirklichkeit ein Stück über dem Boden (Fig. 5). Berücksichtigt man außerdem die sphärische Abweichung des Hohlspiegels, so kommt man zu dem Ergebnis, daß sich die Schallenergie auf einer Fläche um den symmetrischen Punkt herum sammelt. An dieser Stelle mußte sich nun durch Belegen des Bodens mit Stoff eine sehr wirksame Dämpfung anbringen lassen. Es wurde eine Fläche von 6 qm mit mehrfach übereinanderliegendem Molton bedeckt. Diese Fläche ist im Vergleich zu der Bodenfläche von 45 qm als klein anzusehen.

Die Fig. 12 zeigt das Ergebnis. Vergleicht man dieses Diagramm mit Fig. 10, das mit genau der gleichen Aufstellung (Pistole und Mikrophon bei *e*, Fig. 2) aufgenommen wurde, so sieht man, daß die Randstrahlen, weil sie die Dämpfungsfläche nicht berühren, von der Dämpfung auch nicht beeinflußt werden (2), daß aber die Reflexion der Mittelstrahlen (4) bei Fig. 12 fast völlig unterdrückt ist.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei der Aufstellung des ersten Falles (Pistole und Mikrophon bei *a*, Fig. 2). Wenn sich Pistole und Mikrophon in der Mitte des Bodens befinden, läßt sich eine starke Dämpfung nur dadurch bewirken, daß man den ganzen Boden mit schallabsorbierendem Stoff belegt. So wurde bei Fig. 13 der gesamte Boden mit lose gefaltetem Molton bedeckt. Vergleicht man diese Figur mit Fig. 8, so erkennt man, wie stark die Dämpfung bereits bei Reflexion (2) gewirkt hat, und wie vor allem alle späteren Reflexionen fast verschwunden sind.

c) Einfluß der Eigentöne der Eingangshalle

Beim Abhören eines Knalles im ungedämpften Raum fiel es auf, daß, nachdem die einzelnen scharfen Reflexionen, die man gut wahrnehmen konnte, verklungen waren, ein musikalischer Ton hörbar wurde. Um das mit dem Oszillographen festhalten zu können, mußte der Knallvorgang etwa 2 Sek. nach dem Schuß mit größerer Empfindlichkeit aufgezeichnet werden. Auf diese Weise wurde Fig. 14 aufgenommen. Der Charakter des Knallbildes hat sich dann vollkommen verändert. Aus den aperiodischen Druckstößen mit langen Pausen ist eine komplizierte kontinuierliche Schwingung geworden. Das Schwingungsbild ist anfänglich noch sehr unübersichtlich, vereinfacht sich jedoch zusehends und besteht nach 2 Sek. im wesentlichen nur aus zwei Frequenzen, die schwach gedämpft langsam ausklingen.

Diese beiden Frequenzen sind Eigentöne der Halle, die durch den Knall angeregt werden. Der Grundton hat eine Periodenzahl von 130/Sek., der unharmonische Oberton von 245/Sek. Der Oberton wechselt daher dauernd die Phase gegenüber dem Grundton, wodurch die scheinbar komplizierte Schwingungsform hervorgerufen wird.

Ein ganz ähnliches Diagramm erhielt man, wenn man den tiefen Resonanzton durch Singen anregte und dann das *Nachhallen* oszillographierte (Fig. 15, Kurve a_1). Auch der Oberton von etwa 240/Sek. ließ sich auf diese Weise leicht anregen (Fig. 15, Kurve a_2). Man erhielt dann gleichzeitig einen weiteren Oberton der Frequenz 490, der wieder annähernd, aber nicht genau gleich der Oktave des angeregten Tones war.

Um die Eigenschwingungen des Raumes näher zu untersuchen, wurde am Boden bei e (Fig. 2) ein Lautsprecher, bei d das Mikrophon aufgestellt. Wenn man den Lautsprecher mit 340 Perioden/Sek., ebenfalls einem Resonanzton, erregt, so erhält man Fig. 16.¹⁾ Am Anfang dieses Diagramms wurde der Tonsender eingeschaltet, der Strom des Lautsprechers (Kurve b) geht daher nicht sofort auf seinen Endwert, jedoch ist der elektrische Anlaufvorgang nach $1/16$ Sek. abgelaufen, während

1) Kurve t gibt auch hier den Strom eines Stimmgabelunterbrechers von 32 Perioden/Sek. wieder.

die Schallamplitude (Kurve *a*) erst nach 1,5 Sek. ihren endgültigen Wert erreicht. Das läßt auf eine sehr geringe Dämpfung schließen, wie sich denn auch in Fig. 17 zeigt. Bei (0) wurde der Lautsprecher, der so lange getönt hatte, daß der Beharrungszustand erreicht war, ausgeschaltet. Die Schallamplitude nimmt aber nur *sehr* langsam ab. Nach 1 Sek. beträgt sie im Diagramm noch 50 Proz., nach 3 Sek., das heißt nach etwa 1000 Schwingungen, noch 15 Proz. des Anfangswertes.

Bei einer Änderung der Frequenz erhält man ein anderes Bild. So wurde Fig. 18 und 19 bei der Frequenz 410/Sek. aufgenommen. Auch dieser Ton ist einer der vielen ausgesprochenen Eigentöne der Halle. Die Amplitude steigt hier nicht gleichmäßig an, sondern schwankt, und es treten eine Reihe von Obertönen auf. Ebenso zeigt der Nachhall deutliche Intensitätsschwankungen. Die Obertöne verschwinden hierbei vollkommen; es erstreckt sich auch hier wieder Anhall und Nachhall über mehrere Sekunden.

Um diese langen Nachhallzeiten herabzusetzen, wurden Dämpfungsversuche vorgenommen. Der ganze Boden wurde wieder mit lose gefaltetem Molton mehrfach bedeckt. Fig. 20 zeigt, wie sehr dadurch die Anhall- und Nachhallzeiten vermindert werden. Der Anhall dauert z. B. nur noch $1/10$ Sek., gegenüber mehreren Sekunden ohne Dämpfung. Gleichzeitig wird aber die maximal erreichte Amplitude stark herabgedrückt, wie ein Vergleich der Figg. 18, 19, 20, die mit der gleichen Empfindlichkeit des Empfängers aufgenommen wurden, zeigt.

d) Tonprüfung

Wird nun der Ton des Lautsprechers periodisch unterbrochen, so zeigen sich besonders interessante Erscheinungen.

Um zunächst einen möglichst einfachen Fall zu haben, wurde keine Resonanzfrequenz gewählt. So wurde Fig. 21 mit einer Frequenz von 512/Sek. aufgenommen. Auch hier gibt Kurve *b* den Lautsprecherstrom wieder und läßt erkennen, während welcher Zeiten ein Ton ausgesandt wurde. Der Lautsprecher stand in der Mitte des Raumes am Boden (Fig. 2 *a*), das Mikrophon 2 m von dort entfernt (Fig. 2 *e*). Man sieht, daß die Perioden einander sehr ähnlich sind, so

daß also bei dieser Aufstellung die einzelnen Tongruppen nicht wesentlich übereinandergreifen. Etwas anders liegen die Verhältnisse schon bei Fig. 22, bei der auch der Lautsprecher 2 m aus der Mitte entfernt war (Fig. 2 d). Das Mikrofon stand wieder bei e (Fig. 2). Man sieht, daß hier die beiden Gruppen in wesentlichen Punkten verschieden sind. Da der Lautsprecher ausgeschaltet wurde, bevor das Diagramm abgelaufen war, erkennt man, daß nach dem letzten Ton die Amplitude nach der normalen Pausenzeit noch relativ hoch ist.

Der Einfluß dieses Überdeckens wird jedoch viel deutlicher, wenn man einen Eigenton des Raumes wählt. So wurden die Figg. 23—26 mit dem Ton 410/Sek. aufgenommen. Diese Diagramme sollen gleichzeitig den Einfluß der Dämpfung bei unterbrochenem Lautsprecherschall zeigen. Die Figg. 23—26 wurden daher mit der gleichen Empfindlichkeit aufgenommen, so daß ihre Amplituden, die proportional dem Schalldruck sind, ohne weiteres miteinander verglichen werden können. Zunächst wurden Lautsprecher und Mikrofon in der Mitte des Raumes aufgestellt (Fig. 2a): Figg. 23 und 25 zeigen Klangbilder im ungedämpften Raum, einmal bei kurzen Tönen und langen Pausen, das andere Mal mit langen Tönen und kurzen Pausen. Der Nachhall füllt die ganzen Pausen aus, bei Fig. 25 ist mitunter sogar eine Abnahme der Schallintensität während der Pausen kaum wahrzunehmen.

Viel klarer werden die Klangbilder in diesem Raum, wenn er durch Belegen des Bodens mit Molton künstlich gedämpft wird. Bei kurzen Tönen (Fig. 24) treten die einzelnen Gruppen sehr deutlich hervor, und auch bei langen Tönen (Fig. 26) sinkt die Lautstärke während kurzer Zeit auf nahezu Null herab. Die Fig. 26 zeigt ein treppenförmiges Ansteigen und Abfallen der Amplitude in dem Maße, wie einzelne Reflexionen auf das Mikrofon auftreffen.

Gerade die beiden vorletzten Diagramme sind ein schönes Beispiel dafür, wie stark die Akustik eines Raumes dadurch verbessert werden kann, daß man nur *eine* stark reflektierende Fläche, hier z. B. den Boden, mit dämpfendem Material bedeckt. Auch der subjektive Eindruck entsprach ganz den aufgenommenen Diagrammen. Sowohl Sprache, als auch ein Knall waren in geradezu überraschender Weise gedämpft.

II. Sitzungszimmer der Landwirtschaftlichen Abteilung

Den Unterschied, den man im Klangbild erhält, je nachdem man einen Ton benutzt, der den zu untersuchenden Raum zum Schwingen anregt oder nicht, zeigen in typischer Weise zwei Oszillogramme, die im Sitzungszimmer der Landwirtschaftlichen Abteilung aufgenommen wurden. Das Sitzungszimmer ist ein fast quadratischer Raum — 5,70 m lang; 5,40 m breit und 4 m hoch — dessen Wände völlig kahl sind. In dem Raum befinden sich nur einige Tische und Stühle, die auch wenig Schall absorbieren. Die Akustik des Zimmers ist, obwohl der Raum nicht sehr groß ist, so schlecht, daß eine Verständigung, selbst in geringer Entfernung, erschwert ist, was zum Teil auf ausgesprochene Resonanzlagen in der Gegend der normalen Sprachfrequenzen zurückzuführen ist.

Der Lautsprecher und das Mikrophon wurden auf den Tischen nur 2 m voneinander entfernt aufgestellt, um den Einfluß des direkten Schalles stark hervortreten zu lassen.

Die Fig. 27 wurde mit einem Resonanzton 568/Sek. aufgenommen. Bei der Anregung mit einem Eigenton kommt der ganze Raum ins Schwingen. Im Diagramm treten Ein- und Ausschwingvorgänge mit abgerundeten Druckmaxima auf. Trifft dagegen der anregende Ton nicht mit einer Resonanzlage des Raumes zusammen, z. B. bei der Fig. 28, die mit der Frequenz 503/Sek. aufgenommen wurde, so üben die Rückwürfe der Wände den Haupteinfluß auf das Klangbild aus. Die Reflexionen rufen ganz unregelmäßige Interferenzen hervor, die im Klangbild zu zahlreichen Spitzen Veranlassung geben. Zu bemerken ist hierbei, daß Fig. 28 mit wesentlich größerer Empfindlichkeit aufgenommen wurde. Im Verhältnis zu Fig. 28 hat man sich also die Amplituden von Fig. 27 stark vergrößert zu denken.

III. Großer Physikhörsaal

Fig. 6 zeigt Grundriß und Querschnitt des großen Physikhörsaals. Der Grundriß gleicht dem eines Amphitheaters, die Bankreihen sind in einem Kreissektor um den Experimentiertisch angeordnet. Um den Hörsaal auch für andere Vorlesungen benutzen zu können, während auf dem Experimentier-

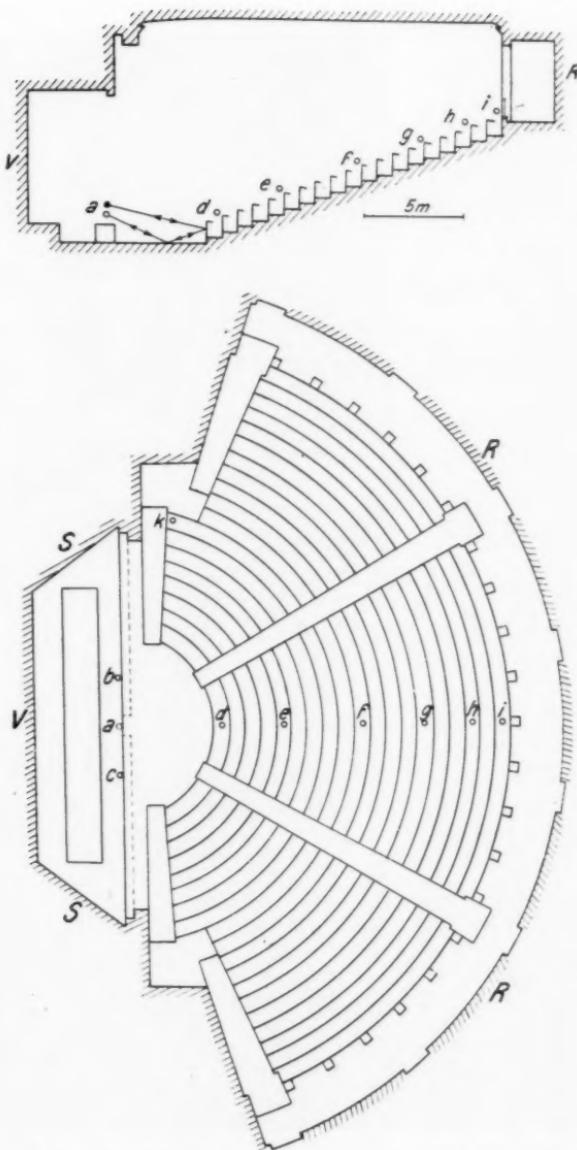


Fig. 6. Querschnitt und Grundriß des großen Physikhörsaals



Fig. 7

tisch Versuche vorbereitet werden, kann der Experimentierraum durch eine Sperrholzwand vom Zuschauerraum getrennt werden. Die Photographie Fig. 7 zeigt den Saal mit vorgeschobener Wand. In Fig. 6 sind die Aufstellungspunkte der Geräte eingetragen und mit Buchstaben versehen.

a) Stoßprüfung

Erzeugt man über der Mitte des Experimentiertisches im geometrischen Mittelpunkt der Bankreihen einen Knall (Fig. 6 bei *a*), so wird derselbe nacheinander von jeder Bank reflektiert und wieder an der Schußstelle gesammelt. Ein Mikrophon, das neben der Pistole steht, zeichnet also zuerst den direkten Knall und dann nach einer Pause die Reflexion der einzelnen Bänke auf. Diese folgen aufeinander mit einer Zeitdifferenz, die sich aus dem Bankabstand von $a = 80$ cm ergibt. Bei einer Schallgeschwindigkeit von $v = 340$ m/sec erhält man eine Zeitdifferenz von

$$t = \frac{2a}{v} = \frac{2 \cdot 0,8}{350} = \frac{1}{212} \text{ Sek.}$$

Der entstehende Reflexionston¹⁾ hat also eine Schwingungszahl von 212/Sek.

Das mit dieser Aufstellung (Pistole und Mikrophon bei *a* [Fig. 6]) aufgenommene Oszillogramm zeigt Fig. 29. Geschossen wurde schräg nach oben zum Zuhörerraum hin. Man erkennt bei (0) den direkten Schall, dann eine Pause, bis der Schall von der ersten Bank zurückkommt (1) und darauf die in regelmäßigen Abständen eintreffenden Rückwürfe der übrigen Bankreihen (3, 4 usw.). Man hat hier ein deutliches Bild des sogenannten „Scale“-Effektes. Die Rückwürfe (1) bis (3) sind modifiziert durch eine stark ausgeprägte Reflexion der Bodenfläche vor den Bänken, deren Verlauf in den Querschnitt des Saales eingezeichnet ist. Auf die letzten Bankreihen trifft der Schall schräg von unten auf und wird zum größten Teil zur Decke reflektiert. Das führt dazu, daß die Rückwürfe der letzten Bänke, die schon durch die größere Entfernung ge-

1) J. J. Oppel, Pogg. Ann. 94. S. 357 u. 530. 1855; 101. S. 105. 1857; 122. S. 335. 1863; 144. S. 307. 1871.

schwächt sind, sehr klein ausfallen. Zuletzt trifft die Reflexion der Saalrückwand (Fig. 6, *R*), das heißt der Wand, die sich im Rücken der Hörer befindet, ein (5), diese wird von der Saalvorderwand (Fig. 6, *V*) noch einmal zum Mikrofon zurückgeworfen (6). Die nun folgenden Reflexionen sind wegen des komplizierten Verlaufes der Schallstrahlen im einzelnen schwer zu erklären. Es zeigt sich aber immer noch die Periodenzahl von 212/Sek.

Es ist bemerkenswert, daß die Bänke, die aus nur 12 mm starkem Sperrholz bestehen, so stark und regelmäßig reflektieren.

Dreht man die Schußrichtung um 180° , schießt also auf die Vorderwand zu, so tritt die Reflexion dieser Wand sehr stark hervor (Fig. 30). Auch hierbei tritt der Scaleeffekt auf, ist aber nicht so klar zu erkennen, wegen der Überlagerung von direktem Schall und Vorderwandreflexion. Es trifft zuerst die Wandreflexion (1) ein, dann die Reflexion der ersten Bänke (2). Bei (3) stören sich dann direkter Schall und Wandreflexion.

Ein ausgesprochen guter Scaleeffekt tritt nur auf, wenn Pistole und Mikrofon genau im Kreismittelpunkt stehen. Selbst wenn nur das Mikrofon 2,5 m aus der Mitte gerückt wird (z. B. nach *b* in Fig. 6) treten nur unregelmäßige Reflexionen auf (Fig. 31 (1) 1. Bank, (5) Rückwand).

Liegt die Schußstelle außerhalb der Mitte, so vereinigen sich, ähnlich wie bei der Eingangshalle, die Schallstrahlen in einem symmetrisch gelegenen Punkt. Bringt man also die Pistole an die Stelle *b*, das Mikrofon aber nach *c* (Fig. 6), so erhält man wieder die regelmäßigen Reflexionen. Fig. 32 zeigt daher den Scaleeffekt fast genau so gut wie Fig. 29.

Um die durch die Hörer herbeigeführte Dämpfung der Bankreflexionen untersuchen zu können, wurde der Versuch während der Physikvorlesung im besetzten Hörsaal wiederholt. Die auf diese Weise erhaltene Fig. 33 ist ebenfalls mit Fig. 29 zu vergleichen. Das Resultat entsprach den Erwartungen: Der direkte Knall (0), die Reflexionen der ersten Bank (1) und des Bodens (2) waren unverändert. Die Rückwürfe der folgenden Bänke sind zwar wegen der starken Überhöhung der Bankreihen noch gut zu erkennen (3, 4), aber doch sehr stark

gedämpft, während die Reflexion der Rückwand ungeschwächt bleibt (5).

Bei der Beurteilung eines Hörsaals, in dem meistens von einer Stelle aus gesprochen wird, ist vor allem die Frage wesentlich: Wie ist der Redner an verschiedenen Plätzen zu verstehen? Im Experiment also: Wie ändert sich die Schwingungsform des Schalles, wenn man den Aufstellungspunkt des Empfangsgerätes variiert? Zur Untersuchung dieser Frage wurden eine Reihe von Oszillogrammen aufgenommen, von denen hier drei wiedergegeben seien.

Das Mikrophon stand bei

Fig. 34 an der Stelle *d*,

Fig. 35 an der Stelle *f*,

Fig. 36 an der Stelle *i*.

Geschossen wurde stets im Kreismittelpunkt (Fig. 6a) in Richtung der Mittelachse. Man sieht, wie verschieden das Knallbild an den einzelnen Stellen des Hörsaals verläuft. Zwei Reflexionen sind es vor allem, die sich bei dieser Figurenreihe gut verfolgen lassen: Der Rückwurf des Bodens (1) und der Decke (2). Die weiteren Reflexionen sind wegen des komplizierten Verlaufes der Schallstrahlen wenig übersichtlich und für jeden Platz verschieden. Die mit (1) bezeichnete Reflexion der Bodenfläche vor den Bänken tritt besonders hervor in dem Knallbild der ersten Bank (Fig. 34) mit einem Umweg von 1,6 m wie es der räumlichen Anordnung entspricht. Sichtbar ist sie aber auch noch bei der zehnten Bank (Fig. 35).

Umgekehrt tritt die Deckenreflexion (2) immer mehr in Erscheinung, je weiter nach hinten das Mikrophon aufgestellt wird. In der ersten Bank (Fig. 34) ist der Wegunterschied noch sehr groß — etwa 14 m — und die Amplitude wegen der Richtwirkung der Pistole noch sehr klein. Je weiter man nach hinten kommt, um so geringer wird die Wegdifferenz und um so mehr wächst die Amplitude im Verhältnis zu derjenigen des direkten Knalles (0), so daß beide in der letzten Bank (Fig. 36) fast gleich groß sind und nur noch einen Wegunterschied von 4,5 m besitzen.

Bei einem weiteren Diagramm (Fig. 37) wurde dann das Mikrophon an einem Seiteneingang aufgestellt (Fig. 6, *K*). Der

Verlauf des Diagramms ist sehr einfach, außer dem direkten Schall tritt keine größere Druckamplitude auf. (1) ist hierbei der Rückwurf der Decke.

Von dieser Versuchsreihe wurde ebenfalls ein Oszillogramm im besetzten Hörsaal wiederholt (Fig. 38). Das Mikrophon stand wie bei Fig. 36 in der letzten Bankreihe (Fig. 6, i). Naturgemäß ist ein Einfluß der Hörer auf die ersten Amplituden: Direkter Schall (0) und Deckenreflexion (2) nicht zu erkennen. Erst später macht sich eine stärkere Dämpfung bemerkbar.

Sehr wesentlich für das Aussehen der Oszillogramme ist die Schußrichtung. Fig. 39 bringt bei der gleichen Aufstellung von Mikrophon und Pistole wie bei Fig. 36 (Pistole bei *a*, Mikrophon bei *i* in Fig. 6) einen Schuß gegen die Saalvorderwand. Der direkte Schall (0) ist in dem Bilde kaum sichtbar, dann folgt eine Reflexion des Bodens im Experimentierraum (1) und schließlich als eigentlicher Träger der Schallenergie die starke Reflexion der Saalvorderwand (2). Außerdem heben sich die Rückwürfe der Decke (3) und der Rückwand (4) ab.

b) Tonprüfung

Obwohl der Hörsaal, wenn er besetzt ist, eine gute Akustik hat, erwiesen sich im leeren Raum die Reflexionen als so stark, daß die mit unterbrochenem Lautsprecherschall aufgenommenen Figuren ein sehr verwickeltes Aussehen erhielten. Auch hierbei stand die Schallquelle im Kreismittelpunkt auf dem Experimentiertisch (Fig. 6 *a*). Das Mikrophon wurde bei Fig. 40 in der Mitte der 17. Bank (Fig. 6 *h*), bei Fig. 41, wieder beim nördlichen Seiteneingang (Fig. 6 *k*) aufgestellt.

Mit dem Ohr konnte man an diesen Plätzen Schallzeiten und Schallpausen gut unterscheiden. Hörte man aber hinter dem Verstärker mit einem Kopfhörer ab, so hörte man nur ein langgezogenes Hallen ohne jeden klaren Absatz. Auf diesen Unterschied einer mikrofonischen Übertragung und des natürlichen Hörens, mit seinem ausgesprochenen Richtungsempfinden, ist schon wiederholt hingewiesen¹⁾ worden. Das gleiche beweisen

1) E. Meyer, E. N. T. 4. S. 137. 1927; H. E. Hollmann, ebenda S. 180.

auch die beiden Figg. 40 und 41. Der Schallvorgang füllt die ganze Pause aus. Die einzelnen Gruppen gleichen einander nicht, und zeigen besonders bei Fig. 41 ein ganz verschiedenes Aussehen.

IV. Allgemeine Ergebnisse

a) Vergleich der beiden Meßverfahren

Die Stoßprüfung gestattet es, die einzelnen Reflexionen voneinander zu trennen und aus der Laufzeit fast stets in eindeutiger Weise die Reflexionsfläche zu bestimmen. Ein Beispiel dafür bietet die Aufnahme des Scaleeffektes im großen Hörsaal (Fig. 29), bei der alle zu erwartenden Reflexionen sichtbar sind. Im Gegensatz dazu ist die Tonprüfungsaufnahme im großen Hörsaal (Figg. 40 und 41) vollkommen unübersichtlich und läßt keinen Schluß über die reflektierenden Flächen zu. Wie man den Strahlenverlauf aus Schußaufnahmen ermitteln kann, sieht man aus Fig. 5, in der für die Diagramme 10 und 11 der Verlauf der Schallstrahlen in der Eingangshalle gezeichnet ist.

Bei der Beurteilung von Bildern der Stoßprüfung ist es unbedingt notwendig, auf die Zeiten zwischen direktem Schall und Reflexion zu achten. Alle Reflexionen, die in weniger als ungefähr $1/15$ Sek. auf das Mikrofon auftreffen, gehören erfahrungsgemäß zu dem erwünschten verstärkenden Nachhall, während die später eintreffenden Reflexionen den störenden Nachhall erzeugen. Instruktiv ist in dieser Hinsicht ein Vergleich der Figg. 22 und 23 der Arbeit von W. Schindelin: die Stoßprüfung (Fig. 22) gibt zwar im stark gedämpften kleinen Rundfunksenderraum kräftige Reflexionen, aber wenn man den Zeitmaßstab beachtet, so erkennt man, daß die Reflexionen nach $1/15$ Sek. praktisch abgelaufen sind, so daß sie sich nicht mehr störend bemerkbar machen; dementsprechend zeigt die Tonprüfung (Fig. 23) eine sehr geringe Verzerrung.

Wenn man dies berücksichtigt, läßt sich die Akustik eines Raumes im allgemeinen auch mit der Stoßprüfung gut beurteilen. Im großen Senderaum z. B. treffen die Reflexionen sehr viel später ein, daher sehen auch die Tongruppendiagramme sehr viel verwickelter aus, wie man aus den Figg. 31—37 der

Arbeit von W. Schindelin entnehmen kann. Wenn es sich darum handelt, möglichst schnell ein Bild von den akustischen Vorgängen in einem großen Raum zu gewinnen, ist die Stoßprüfung vorzuziehen.

Über den Einfluß der Frequenz kann die Stoßprüfung natürlich keinen Aufschluß geben; es kommt dafür nur die Tonprüfung in Betracht.

Ein Vorteil der Tonprüfung ist der, daß sie den praktisch gegebenen Verhältnissen — Hörbarkeit der Sprache — in einem Raum näher liegt. Man wird infolgedessen aus den Ergebnissen der Tonprüfung im allgemeinen einen direkteren Schluß auf die akustische Brauchbarkeit eines Raumes ziehen können.

b) Akustische Mängel

Unter den Ursachen der schlechten Akustik eines Raumes traten bei den vorliegenden Versuchen besonders zwei hervor: reine Reflexionen und die Erregung von Eigenschwingungen. Typische Beispiele hierfür bieten die Eingangshalle und das Sitzungszimmer der Landwirtschaftlichen Abteilung.

Den Einfluß der reinen Reflexionen zeigen die Figg. 21 und 22 für die Eingangshalle und Fig. 28 für das Sitzungszimmer. Beachtungswert ist, daß solche Reflexionen auch an Holzflächen stattfinden, wie die Aufnahmen im großen Hörsaal erkennen lassen.

Der Charakter der Figg. 25 bzw. 27 ist auf die Erregung von Eigenschwingungen zurückzuführen. Starke Reflexionen und starke Eigenschwingungen sind natürlich nicht unabhängig voneinander, da ein gut gedämpfter Raum auch stark gedämpfte und daher kaum hervortretende Eigenschwingungen haben muß. Besonders unangenehm ist es, wenn ausgesprochene Eigentöne im Gebiet der Sprachfrequenzen liegen. Man vergleiche hierzu die Fig. 27 vom Sitzungszimmer mit Oszillogrammen 23—25 der Arbeit von W. Schindelin, die mit ganz ähnlicher Aufstellung der Meßgeräte in dem ungefähr gleich großen Senderaum aufgenommen wurden.

Töne, deren Frequenz verschieden ist, rufen, wenn sie genügend weit von einer Resonanzlage des Raumes entfernt waren, kein dem Charakter nach verschiedenes Bild hervor,

(Fortsetzung S. 193)

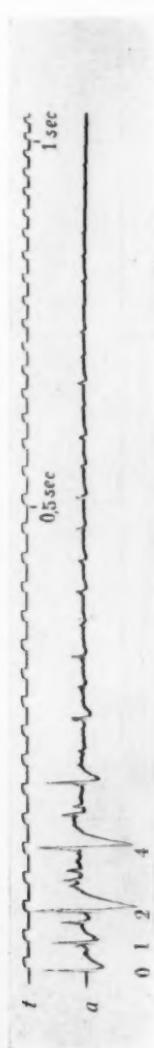


Fig. 8

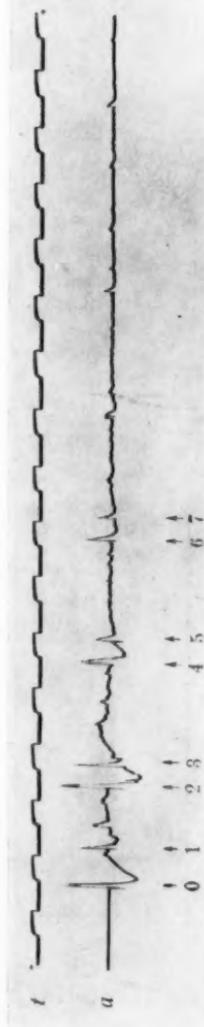


Fig. 9



Fig. 10

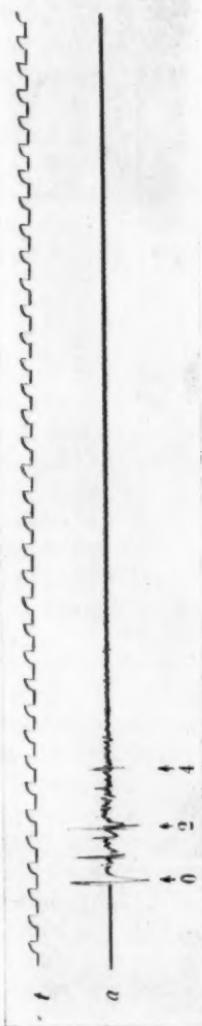
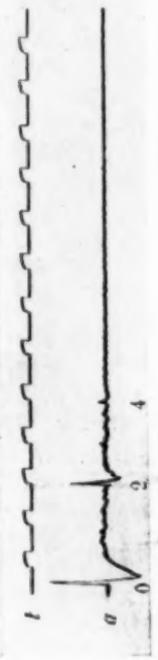
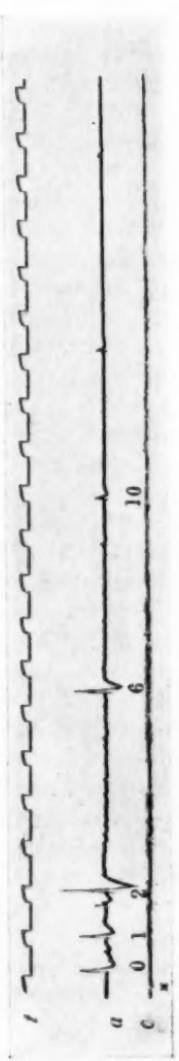


Fig. 13



Fig. 14



Fig. 15

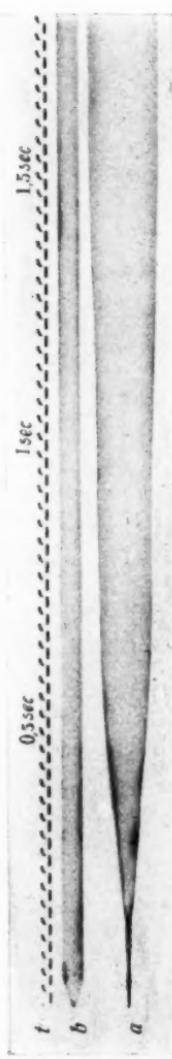


Fig. 16

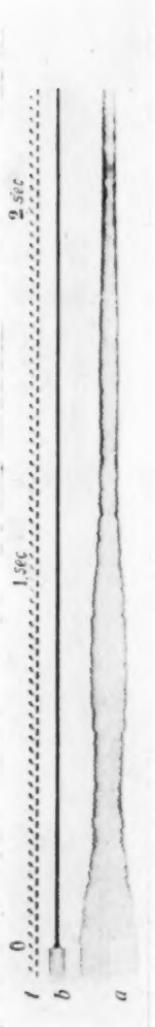


Fig. 17

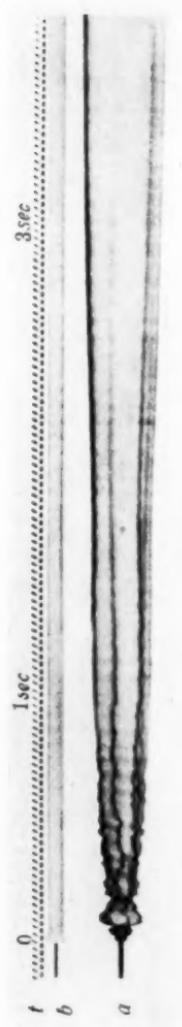


Fig. 18

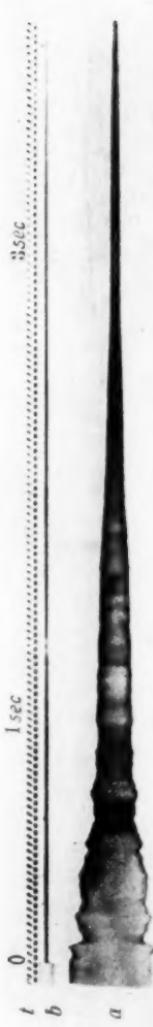


Fig. 19

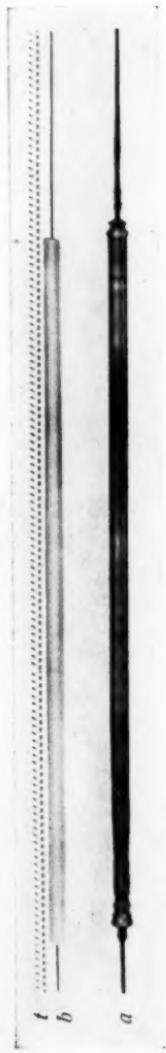


Fig. 20

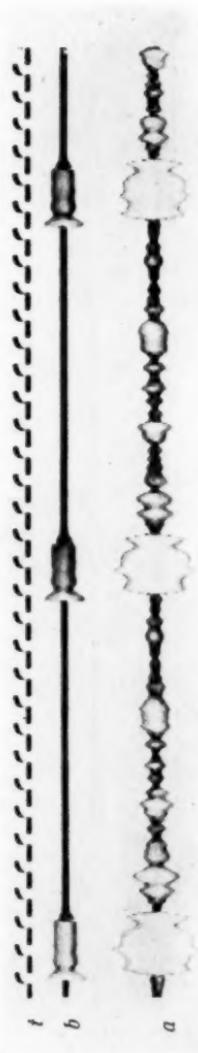


Fig. 21

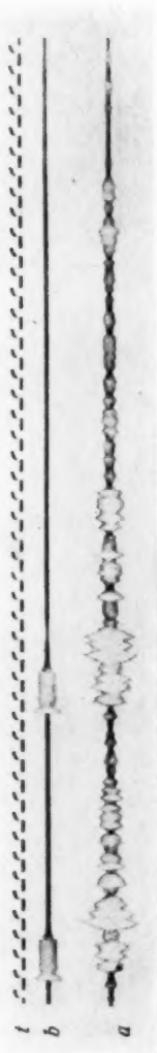


Fig. 22

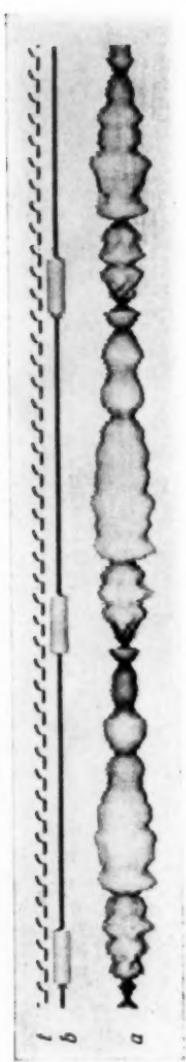


Fig. 23

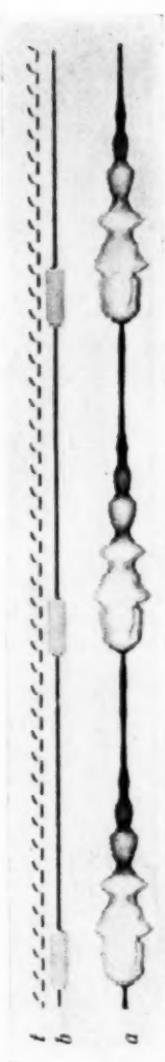


Fig. 24

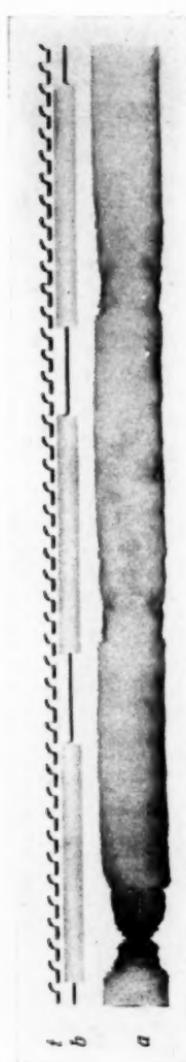


Fig. 25

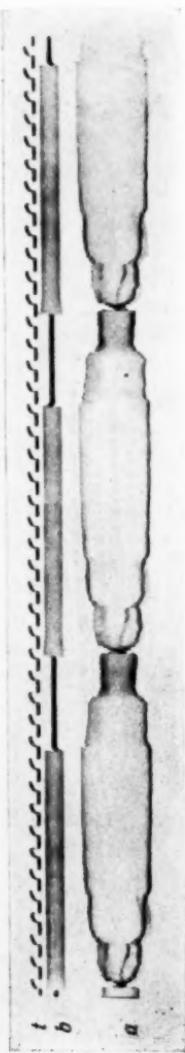


Fig. 26

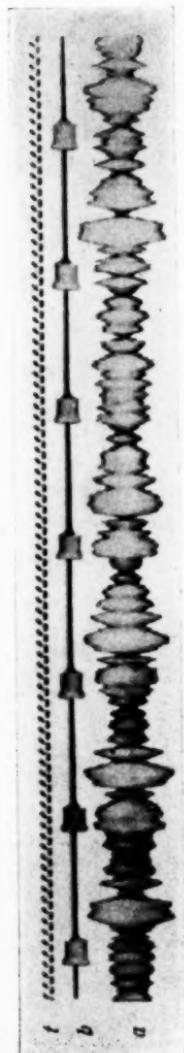


Fig. 27

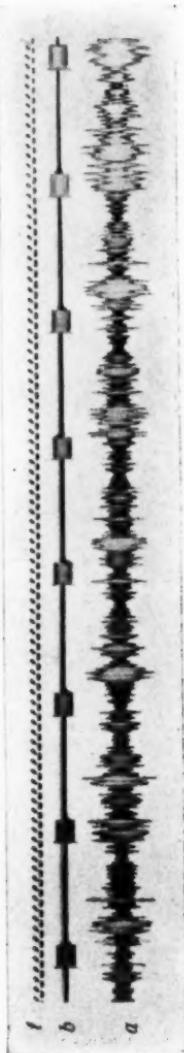


Fig. 28

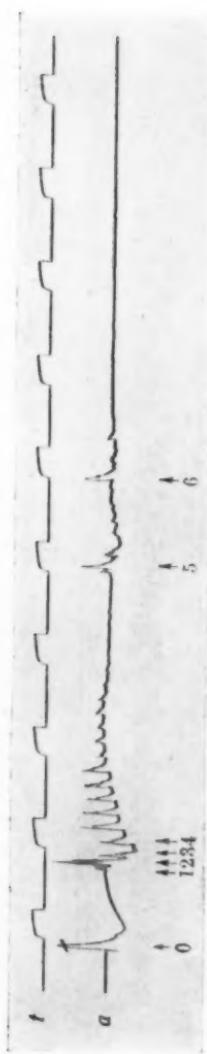


Fig. 28

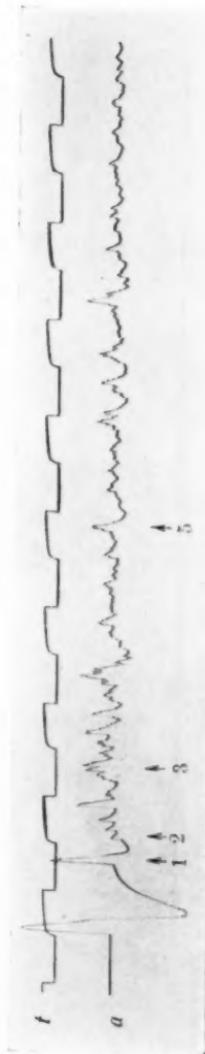


Fig. 29

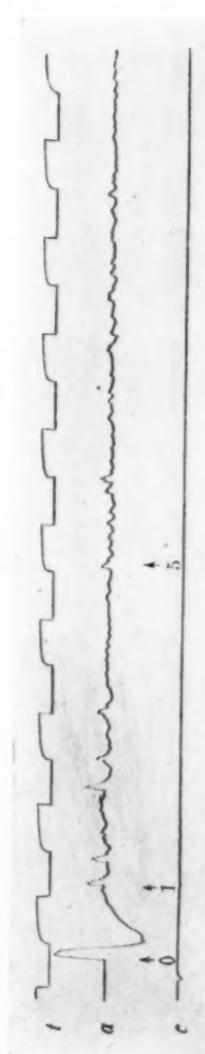


Fig. 30

Fig. 31

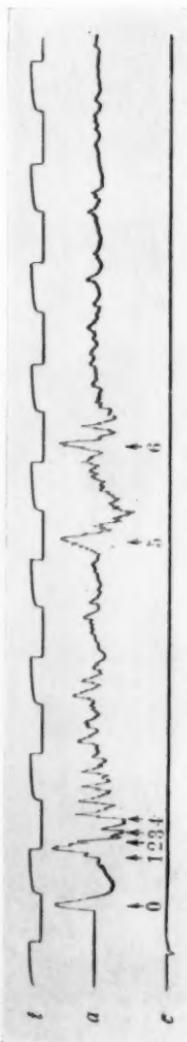


Fig. 32



Fig. 33

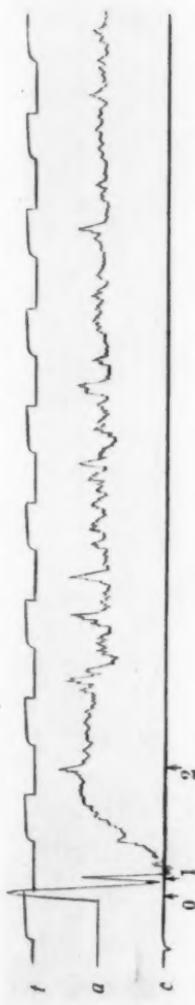


Fig. 34

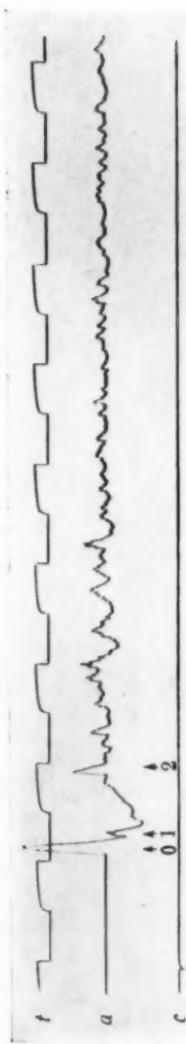


Fig. 35

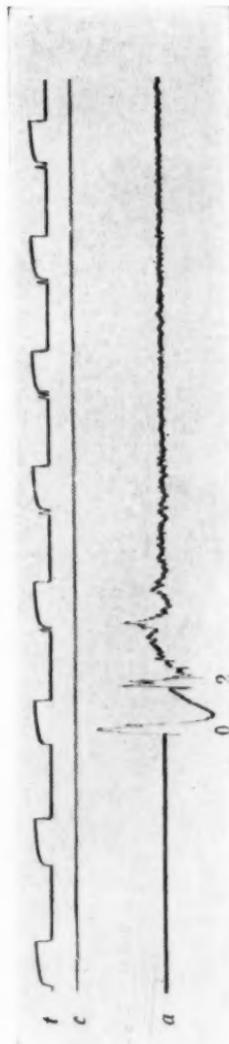


Fig. 36

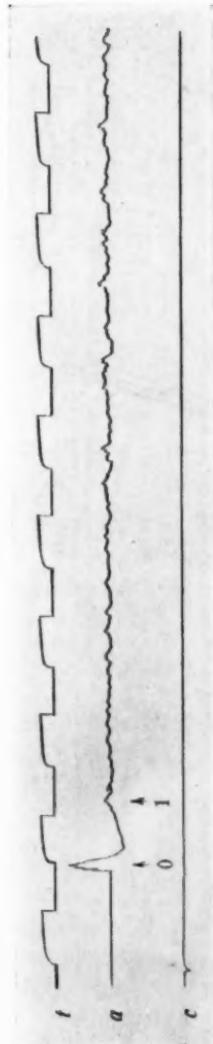


Fig. 37

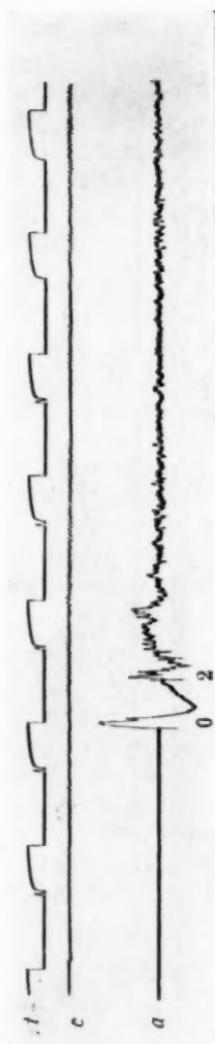


Fig. 38

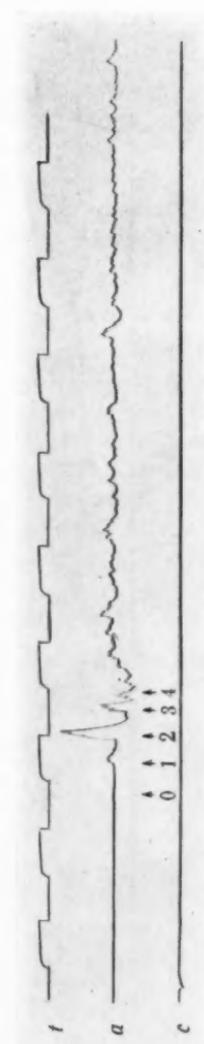


Fig. 39

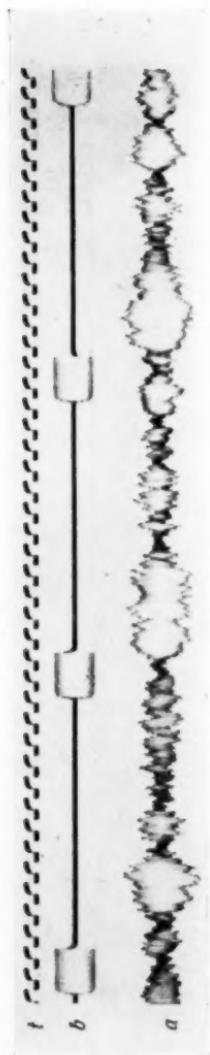


Fig. 40

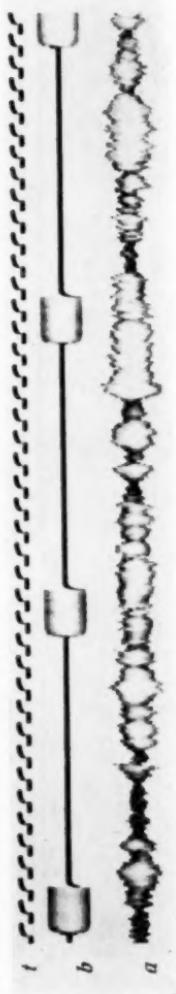


Fig. 41

wenigstens nicht in dem Frequenzgebiet, innerhalb dessen wir die Frequenz variierten (225 bis 1070/Sek.).

Bei den Aufnahmen, bei denen der Platz des Mikrofons bei gleicher Aufstellung des Schallsenders geändert wurde, zeigten sich gelegentlich große Verschiedenheiten. In solchen Fällen kann man nicht von einer schlechten oder guten Akustik des Raumes im ganzen, sondern nur von einer guten oder schlechten Hörsamkeit bestimmter Plätze bei der betreffenden Aufstellung des Senders reden.¹⁾ Solche starken Unterschiede treten besonders bei Kuppeln und gekrümmten Wandflächen auf.

e) Verbesserung der Akustik eines Raumes

Wie stark sich die Akustik eines zu schwach gedämpften Raumes durch Verdecken einer einzigen stark reflektierenden Fläche mit schallabsorbierendem Stoff verbessern läßt, zeigen die Figg. 18 ff. Die Verbesserung der Hörsamkeit war in diesem Falle auch für das Ohr eine überraschende. Aus Fig. 12 ersieht man ferner, daß sich unter Umständen, wenn die Stellung der Schallquelle gegeben ist und sich die Schallstrahlen durch die Wölbung von Flächen in einzelnen Punkten sammeln, eine wirksame Dämpfung schon durch Belegen einer ganz kleinen Fläche bei den Schallsammelpunkten erreichen läßt.

München, Physikalisches Institut der Technischen Hochschule.

1) Vgl. den nachfolgenden Aufsatz über die Akustik der Aula der Universität Freiburg im Breisgau.

(Eingegangen 8. April 1929)

Beiträge zur Raumakustik
*(Die Akustik der Aula in der Albert-Ludwigs-Universität
 in Freiburg i. Br.)*

Von E. Scharstein und W. Schindelin

(Mit 9 Figuren)

Die Aula der Universität in Freiburg i. Br. besitzt eine besonders schlechte Akustik, die bei Vorträgen und Feiern äußerst störend ist. Wir wurden durch Vermittlung von Hrn. Prof. Dr. J. Zenneck gebeten, Messungen über die Ursache der schlechten Akustik dieses Saales durchzuführen.

Die von uns benutzten raumakustischen Untersuchungsmethoden sind in der Arbeit von W. Schindelin: Beiträge zur Raumakustik¹⁾ beschrieben.

Grund- und Aufriß der Aula sind in Figg. 1 und 2 gezeichnet. Die Aula ist ein hoher Raum mit elliptischem Grundriß und gewölbter Decke. An den eigentlichen Festsaal schließt sich hinten ein rechteckiger niederer Vorraum an.

Wichtig war es vor allem, den Schallverlauf für den Fall, bei dem die Schallquelle auf dem Rednerpult bei *a* aufgestellt war, kennen zu lernen. Die in dieser Arbeit erwähnten Aufstellungspunkte der Meßgeräte sind im Grund- und Aufriß des Raumes in Figg. 1 und 2 mit Buchstaben versehen.

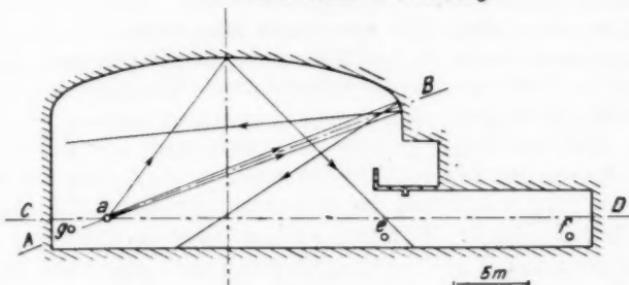
Es wurde zunächst eine Reihe von Oszillogrammen mit unterbrochenem Lautsprecherschall aufgenommen, die den Schallverlauf an verschiedenen Stellen des Raumes wiedergeben sollten. Die Schalldruckkurve ist natürlich verschieden, je nachdem der Saal leer oder besetzt ist, da Personen auf den Schall eine stark dämpfende Wirkung ausüben. Diese Dämpfung wurde von uns durch schallabsorbierenden Stoff, mit dem der Boden und die Stühle belegt waren, ersetzt.

1) W. Schindelin, Ann. d. Phys. [5] 2. S. 129. 1929.

Alle weiter unten reproduzierten Diagramme sind im gedämpften Saale aufgenommen.

Es zeigt sich in der Nähe des Rednerpultes ein sehr starkes Echo. Stand das Mikrofon direkt bei der Schall-

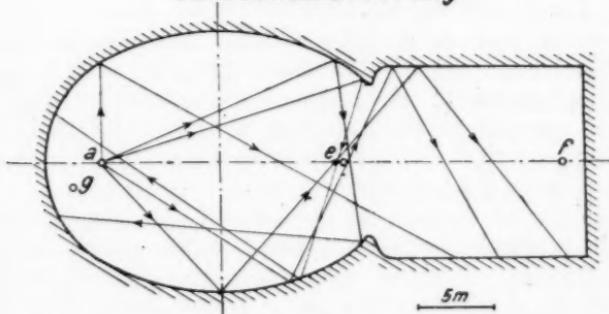
Universitätsaula in Freiburg



Längsschnitt

Fig. 1

Universitätsaula in Freiburg



Schnitt: C-D

Grundriß

Fig. 2

quelle, so trat die Amplitude des Echoes gegenüber dem dort sehr starken direkten Schall natürlich etwas zurück (Fig. 4: Lautsprecher und Mikrofon bei *a*). Die Kurve *t* ist bei allen Figuren der Strom einer elektromagnetisch erregten Stimm-
gabel von 32 Perioden/Sek., der zur Zeitmarkierung diente.

Kurve *b* zeigt den Lautsprecherstrom an und gibt die Schallzeiten und Schallpausen wieder, während deren der Lautsprecher ein- bzw. ausgeschaltet war. Kurve *a* ist die oszillographische Aufzeichnung der verstärkten Mikrophonspannung, die für den Schallverlauf an den einzelnen Stellen des Raumes charakteristisch ist. Die Amplituden der verschiedenen Oszillogramme sind nicht quantitativ miteinander vergleichbar, sondern es wurde die Verstärkung des Empfangsgerätes jedesmal so eingestellt, daß die aufzunehmende Kurve eine passende Größe erhielt.

An den Plätzen hinter dem Rednerpult, die bei Festlichkeiten von dem Lehrkörper eingenommen werden, besitzen der direkte Schall und das Echo ungefähr die gleiche Intensität (vgl. Fig. 5: Mikrophon bei *g*). Bei der großen Zeitdifferenz von $1/10 - 1/5$ Sek. zwischen beiden wirkt das Echo äußerst störend, so daß man einen Redner bei *a* kaum versteht. Nach der Mitte des Raumes nimmt das Echo schnell an Intensität ab, bis es nur noch als allgemeiner Nachhall wahrnehmbar ist.

Fig. 6 zeigt den Schallverlauf an der symmetrisch zu *a* liegenden Stelle *e*, die eine ziemlich gute Akustik besitzt, während Fig. 7 die Schalldruckkurve ganz hinten im Vorraum (Mikrophon bei *f*) wiedergibt. Diese Schalldruckkurve ist, wenn man die große Entfernung zwischen Schallquelle und Mikrophon berücksichtigt, verhältnismäßig günstig. Die Schallintensität bei *f* ist allerdings gering.

Versuche darüber, ob die Akustik des Raumes durch Verlegen des Rednerpultes verbessert werden könnte, zeigten ein negatives Ergebnis. Das Aufstellen des Lautsprechers direkt an der Vorderwand bei *a* brachte keine wesentliche Änderung. Bei anderen Aufstellungen, wie z. B. an der Seite des Saales, fanden sich immer wieder Plätze mit sehr schlechter Akustik, so daß auf diesem Wege keine Verbesserung zu erzielen ist.

Ebenso wie in den früheren Arbeiten suchten wir mit Hilfe von Schußdiagrammen, die über die Wege der einzelnen Schallstrahlen Aufschluß geben sollten, die Akustik an den verschiedenen Stellen des Raumes zu erklären. Es ergab sich aber eine Schwierigkeit. Wir konnten die Ergebnisse unserer

Oszillogramme nicht mit den uns zur Verfügung stehenden Bauplänen in Übereinstimmung bringen. Die Ausmessung eines Schußdiagrammes, bei der das Mikrophon bei *e* stand, gab eine Laufstrecke für die Deckenreflexion, die um 1,50 m kürzer war als die nach dem Plan errechnete. Tatsächlich ergab eine Nachmessung der Raumhöhe mit einem Spiegelsextanten, daß die im Plan eingezeichnete Deckenhöhe um 75 cm zu groß war, was mit unseren Oszillogrammen übereinstimmte. Da die Baupläne auch den Verlauf der für die Akustik wesentlichen gekrümmten Deckenflächen nicht richtig wiedergaben, legten wir zur Auswertung unserer Diagramme einen Längsschnitt nach Fig. 1 zugrunde, der nach unseren Messungen den wirklichen Verhältnissen ziemlich nahekommen dürfte.

Die Fig. 8 zeigt ein Knallbild, bei dem die Pistole bei *a* aufgestellt war, während das Mikrophon hinten im Saal bei *f* stand. Die Kurve *b* ist die Aufzeichnung eines Postmikrophones, das direkt neben der Pistole stand, um den Zeitpunkt des Schusses anzugeben. Der einfache Verlauf dieses Bildes steht im Einklang mit der günstigen Schwingungsform in Fig. 7.

Als Beispiel für die Kurven, die unter Heranziehung der Pläne zur Auswertung dienten, ist Fig. 9 wiedergegeben. Pistole und Mikrophon waren dabei auf dem Rednerpult bei *a* aufgestellt. Man sieht zuerst auf dem Oszillogramm bei 0 den direkten Schall bei (1) die Reflexion der ersten Stuhlreihe; (2) ist der Rückwurf der Empore. Von (3) bis (4) ziehen sich die Reflexionen der hinteren Deckenhohlkehle hin. Diese im Schußdiagramm schnell aufeinander folgenden Rückwürfe überlagern sich bei länger andauerndem Schall, z. B. Lautsprecher-ton oder Sprache, und rufen das Echo beim Rednerpult hervor.

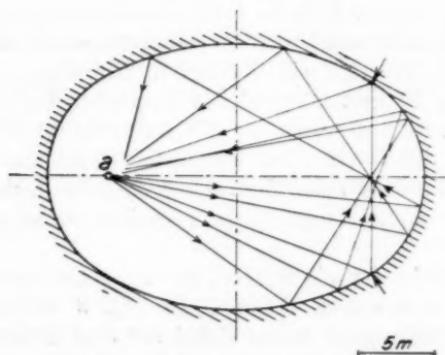
Daß die Reflexion der Saalrückwand bei *f* (Figg. 8 und 9) eine so große Amplitude im Schußdiagramm besitzt, ist auf die gute Richtwirkung der Pistole, die auf diese Wand gerichtet war, zurückzuführen.

Sehr bemerkenswert ist, daß die Saalwände keine ausgeprägteren Rückwürfe hervorrufen, obwohl der Saal einen elliptischen Grundriß besitzt und das Rednerpult annähernd in einem Brennpunkt der Ellipse steht. Die bei einem solchen Grundriß oft sehr stark auftretenden Reflexionen sind hier

durch gute Wandgliederung und vor allem durch die Unterbrechung, die die Wände durch den angebauten Vorraum erhalten, vermieden, denn wie man aus dem im Grundriß Fig. 2 eingezeichneten Verlauf mehrerer Schallstrahlen ersieht, gelangen die meisten von ihnen nach einmaliger Wandreflexion in den Vorraum, wo sie sich totlaufen.

An einem in Fig. 3 wiedergegebenen schrägen Schnitt *A-B* (vgl. Fig. 1) läßt sich zeigen, daß die Schallstrahlen, die teils direkt, teils auf dem Umweg über die Wände auf die hintere Hohlkehle

Universitätsaula in Freiburg



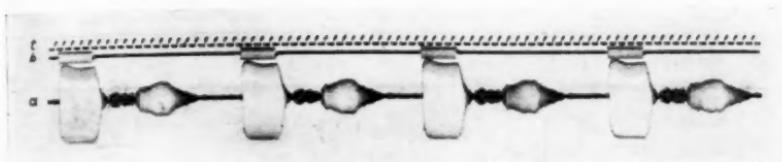
Schnitt: A-B.

Schräger Schnitt

Fig. 3

der Decke auftreffen, zum Rednerpult zurückgeworfen werden und dort das störende Echo hervorrufen. Die Länge des Schallweges stimmt gut mit den gemessenen Zeiten überein. Da auch bei ähnlich liegenden Schrägschnitten sich die Reflexionen der Hohlkehle immer wieder in der Umgebung des Rednerpultes sammeln, ist auch die außerordentliche Intensität des Echoes erklärliech.

Um das Echo zu beseitigen, dürfte es am günstigsten sein, die störenden Reflexionen durch Dämpfung zu vernichten. Vom raumakustischen Standpunkt aus kann kaum ein Zweifel bestehen, daß es möglich ist, dieses durch Verhängung des



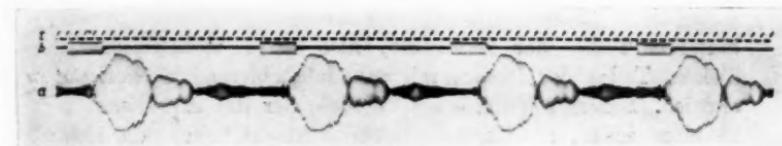
Mikrophon bei *a*

Fig. 4



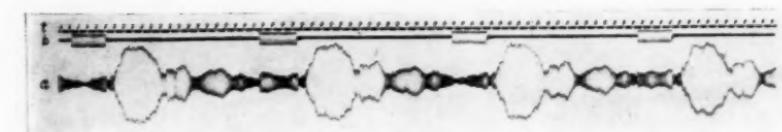
Mikrophon bei *g*

Fig. 5



Mikrophon bei *e*

Fig. 6



Mikrophon bei *f*

Fig. 7

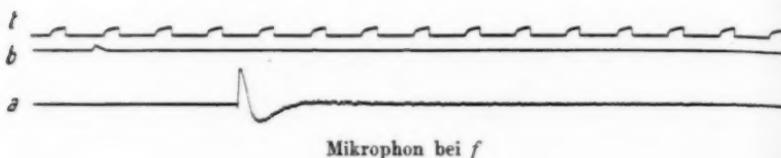
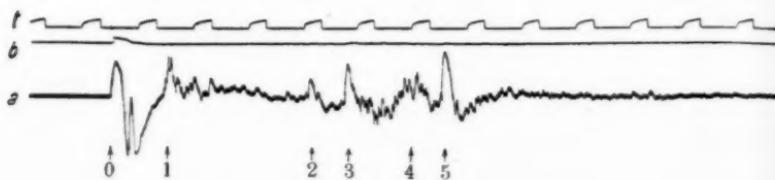


Fig. 8



0: Direkter Schall
 1: Reflexion der 1. Stuhlreihe
 2: Rückwurf der Empore
 3-4: Reflexionen der hinteren Deckenhohlkehle
 5: Reflexion der Rückwand des Vorraumes

Fig. 9

hinteren Teiles der Hohlkehle, also eines verhältnismäßig kleinen Teiles der Decke, mit schallabsorbierendem Stoff zu erzielen. Leider scheiterte ein Versuch, der das experimentell beweisen sollte, an den technischen Schwierigkeiten, die sich der Aufhängung eines solchen schallabsorbierenden Stoffes entgegenstellten und die sich in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit nicht überwinden ließen.

München, Physikalisches Institut der Techn. Hochschule.

(Eingegangen 8. April 1929)

Über Versuche an Wasserstoffatomstrahlen

Teil I.

Über die technische Herstellung von Wasserstoffatomstrahlen und die Wirkung von Wasserstoffatomen auf die Schumannplatte

Von Hans Kerschbaum

(Mit 4 Figuren)

Wasserstoffatomstrahlen sind schon früher zur Untersuchung des magnetischen Momentes¹⁾ von Wasserstoffatomen und für Reflexionsversuche²⁾ an Kristallen benutzt worden. Ihre Erzeugung ist nicht leicht, da einmal im Beobachtungsraum der Druck sehr niedrig sein muß, während im Wasserstoffentladungsraum und Strahlraum verhältnismäßig hoher Druck herrscht, andererseits die Wasserstoffatome sich außerordentlich leicht wieder zu Molekülen vereinigen, und die gebräuchlichen Werkstoffe (Metalle) für die Herstellung von Spalten als starke Katalysatoren wirken. Für die Arbeiten mit Wasserstoffatomstrahlen ist es ferner wichtig, eine Auffangmethode auszuarbeiten, die gestattet, selbst ganz geringe Teile des vorhandenen Atomstrahles kontrastreich nachzuweisen. Das letztere zu erreichen, war besonders notwendig, sollte der Zweck vorliegender Arbeit — Versuche über die Reflexion von Wasserstoffatomen an Kristallen — Erfolg haben. Da ein starker Atomstrahl eine wesentliche Unterstützung für die Versuche bildete, wurden zunächst Versuche über die technische Herstellung der Atomstrahlen und die günstigste Auffangmethode angestellt.

Im ersten Teil dieser Mitteilung soll hierüber berichtet werden, insbesondere über die Wirkung der Wasserstoffatome

1) E. Wrede, Ztschr. f. Phys. **41**, S. 569. 1927; Philips u. Taylor, Phys. Rev. **29**, S. 309. 1927.

2) A. Ellet u. A. F. Olson, Phys. Rev. **31**, S. 643. 1928; T. H. Johnson, Phys. Rev. **31**, S. 1122. 1928.

auf die Schumannplatte, die als Nachweismethode für Wasserstoffatome zu besonderem Erfolg geführt hat.

Im zweiten Teil soll dann über das Ergebnis der Versuche berichtet werden. Hier gelangen Reflexionsaufnahmen von Wasserstoffatomen an Glimmer, Gips und Zelluloid und Aufnahmen über die Streuung von Wasserstoffatomen nach ihrem Durchgang durch ganz dünne Zelluloid- und Glimmerfolien. Die Versuche waren angeregt worden durch die merkwürdigen Ergebnisse der Experimente mit Elektronen von Davisson und L. H. Germer, G. P. Thomson und Rupp. Analog diesen Versuchen sollte man erwarten, daß auch Wasserstoffatome, die mit thermischer Geschwindigkeit unter einem bestimmten Winkel auf eine Kristallplatte auffallen und reflektiert werden oder durch einen Kristall hindurchgehen, ähnliche Beugungerscheinungen zeigen; und zwar in meßbarer Größenordnung nach der Gleichung von L. de Broglie, nach der die Materienwellenlänge

$$\lambda = \frac{\hbar}{m \cdot v}$$

ist, worin \hbar das Planksche elementare Wirkungsquantum, m die Masse des Atoms und v die Geschwindigkeit der Atome bedeutet. Die Aufnahmen, über die im zweiten Teil dieser Arbeit berichtet werden soll, zeigten jedoch nicht die geringste Andeutung eines solchen Effektes.

Hr. Geh. Rat Prof. Dr. W. Wien hat mich im Beginn dieser Arbeit mit vielen wertvollen Ratschlägen unterstützt. Ein tragisches Geschick hat es nicht erlaubt, daß er die ersten Erfolge nach Verwendung der Schumannplatte miterleben konnte. Ich möchte es nicht versäumen, auch an dieser Stelle in dankbarster Erinnerung seiner zu gedenken, mit der traurigen Gewißheit, daß uns sein unendlich reiches Wissen und seine immer hilfsbereite und tatkräftige Unterstützung für immer verloren ist.

1. Herstellung von Wasserstoffatomstrahlen

Es wurde oben erwähnt, daß schon früher Wasserstoffatomstrahlen¹⁾ mit dem Woodschen Rohr²⁾, unter der Be-

1) E. Wrede, Philips u. Taylor, vgl. oben.

2) R. W. Wood, Phil. Mag. [6] 42. S. 729. 1921; 44. S. 538. 1922; Proc. Roy. Soc. A 97. S. 455. 1920; 102. S. 1. 1923.

nutzung der Weiterbildung von Bonhoeffer¹⁾ hergestellt wurden. Glasspalte, die nicht oder nur sehr wenig katalytisch wirksam sind, trennten Strahlraum und Beobachtungsraum. Es wurden Strahlen mit großer Intensität erhalten, wie die Erfolge der Arbeiten von Wrede²⁾ und Philips und Taylor zeigen. Nach eigenen Versuchen mit der elektrodenlosen Ringentladung als Quelle der Wasserstoffatome, die nicht besonders günstig ausfielen, wurde ebenfalls zur Benutzung des Woodschen Rohres übergegangen. Das Wichtigste war nun die Herstellung der Spalträume. Für die Reflexionsversuche war es von besonderer Wichtigkeit, im Beobachtungsraum außerordentlich niedrigen Druck zu haben. Aus diesem Grunde sollte mit drei Spalten, also mit drei voneinander vakuumdicht getrennten Räumen, gearbeitet werden. Sie alle aus Glas nach dem Vorbild von Wrede und Taylor herzustellen und zu justieren, erschien mühsam, noch dazu war vorauszusehen, daß sie öfters erneuert werden mußten. Es wurde deshalb nach Stoffen gesucht, die leicht zu bearbeiten und gleichzeitig katalytisch unwirksam waren. Bei diesen Versuchen stellte sich heraus, daß Zelloid fast katalytisch unwirksam ist und daß mit Zelloid wegen seiner Löslichkeit in Amylacetat leicht zu arbeiten ist. Vor allem sind stets ganz glatte Oberflächen zu erhalten. Aus diesen Gründen wurde als Spaltmaterial bei dieser Arbeit Zelloid verwandt.

Fig. 1a zeigt die Gesamtansicht der Apparatur. Das Woodsche Rohr war 2 m lang, 22 mm Durchmesser Jenaer Glas, die Aluminiumanode 30 mm Durchmesser, 6 cm lang; die Aluminiumkathode 30 mm Durchmesser, 10,5 cm lang. Die Form des Rohres geht aus der Zeichnung hervor. Fig. 1b zeigt die Entnahmestelle der Wasserstoffatome in der Mitte des Rohres, an einer Stelle, wo nur die Breite des Rohres als Lichtquelle vor dem Spalt steht. Letztere Anordnung ist aus später zu besprechenden Gründen getroffen. Mit einem Schliff konnte jede beliebige Röhre an das Woodsche Rohr angesetzt werden. Der Wasserstoff wurde einem Kippschen

1) Bonhoeffer, Ztschr. f. Phys. Chem. **113**. S. 199. 1924; **116**, S. 391. 1925; **119**. S. 385. 1926.

2) E. Wrede, Philips u. Taylor, vgl. oben.

Apparat entnommen, getrocknet, gereinigt und durch eine Kapillare dem Rohr zugeführt. Das Woodsche Rohr wurde mit einer Gleichstrommaschine betrieben, deren Maximalleistung 5000 Volt · 500 mA betrug. Diese Leistung wurde meist voll ausgenutzt, durch geeignete Regulierung der Gaszufuhr, die so günstig wie möglich für die Wasserstoffatomausbeute gewählt wurde.

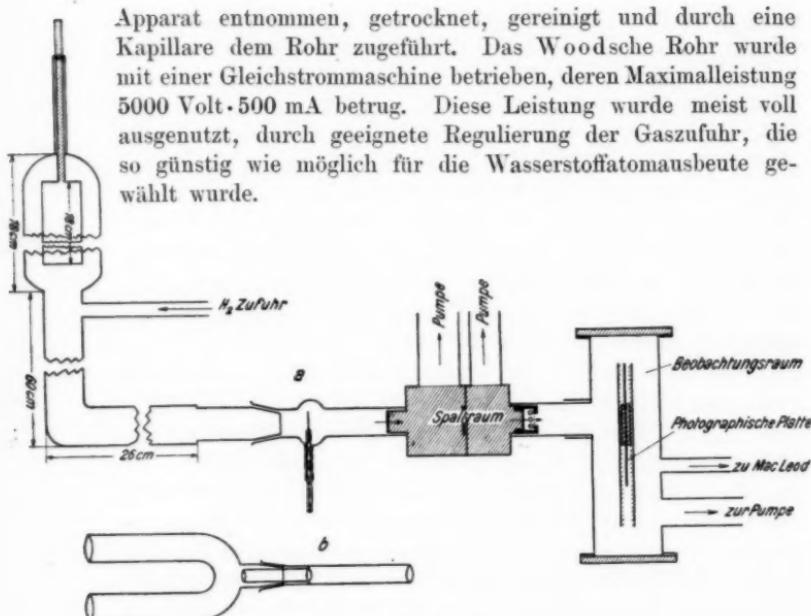


Fig. 1

Fig. 2 zeigt die Spaltanordnung. Zwei ineinander verschraubbare Messingklötze bekamen eine Bohrung von 12 mm, die nach wenigen Zentimetern, zur Einführung der weiten Pumpleitungen, wesentlich durch senkrechtes Anbohren er-

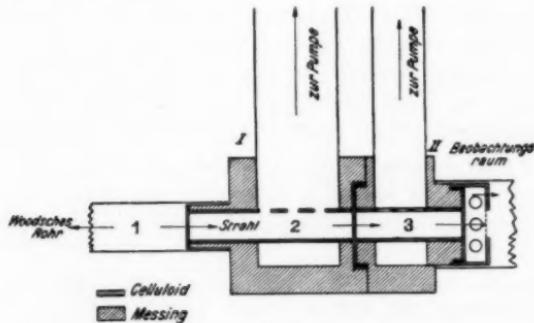


Fig. 2

weitert wurden. In die Längsbohrung wurde ein Zelluloidrohr eingepaßt, das dem Pumprohr gegenüber mit vielen Löchern versehen wurde. Auf die Stirnflächen, die sorgfältigst parallel zueinander abgedreht waren, konnten Zelluloidscheiben, Durchmesser 60—20 mm, Dicke 1 mm, mit einer Lösung von Zelluloid in Amylacetat aufgeklebt werden. Die Spalte wurden durch das Zusammenpressen zweier Zelluloidplatten um ein Metallband hergestellt. Der Querschnitt des Metallbandes bestimmte die Spaltlänge und Breite, wobei zu beachten ist, daß das Metallband stets dünner zu wählen ist, als der endgültige Spalt sein soll, da dieser breiter als das Formblatt wird. Das Metallband konnte später leicht entfernt werden. Die Justierung der drei Spalte geschah auf folgende Weise: Das dünne Metallband wurde durch die beiden Metallklötzte gezogen und durch ein schweres Gewicht gespannt. Die Stirnfläche von Klotz I wurde zunächst senkrecht zu dem Band gestellt und dann Spalt 1 aufgeklebt; später Spalt 2. Klotz II wurde dann auf Klotz I geschraubt und Spalt 3 auf das Ende von Klotz II geklebt. Nach der Trocknung wurde das Metallband herausgezogen und man hatte drei, durch absolut parallele Spalte voneinander getrennte, gegeneinander vakuumdichte Räume vor sich. Die Spaltwände und Stirnflächen waren glatt, da sie mit Acetat abgespült waren. Da bei den vorliegenden Versuchen kreisrunde Löcher als Spalte praktischer und noch einfacher erschienen, so wurde die oben beschriebene Methode mit einem dünnen Draht durchgeführt, dessen Dicke teils 0,2, teils 0,4 mm betrug. Die Löcher in der Scheibe wurden dann oft durch ganz feine Nadeln vorher hergestellt. Es wurde mit drei Pumpen gearbeitet. Raum 1 wurde mit einer Stahldiffusionspumpe, Raum 2 und 3 je mit Glasdiffusionspumpen, Raum 2 teilweise auch mit einer zweiten Stahldiffusionspumpe ausgepumpt. Auf diese Weise erreichte man, trotz des hohen Druckes im Woodschen Rohr, im Beobachtungsraum einen Druck von etwa $5 \cdot 10^{-5}$ mm Hg. Mit flüssiger Luft als Kühlung der Zuleitungen wurden Restdampfdrucke auf ein Minimum herabgesetzt.

Fig. 2 zeigt die Anordnung für die Durchschießung eines Häutchens mit Wasserstoffatomen, die später eingehend behandelt wird. Auf Klotz II konnte eine Messingkapsel ge-

schraubt werden, die mit Pumplöchern versehen war. Auf ihre Stirnfläche konnte ein schmales Zelluloidplättchen geklebt werden, das in der Mitte das Häutchen trug. Die Zentrierung war damit zwangsläufig gegeben, der Strahl kam aber nie mit Metall in Berührung. Der Beobachtungsraum war ein weites Metallrohr, in das die Schumannplatte eingeführt werden konnte (vgl. Zeichnung).

2. Versuche über die günstigste Auffangmethode

Bisher wurde der Wasserstoffatomstrahl stets durch seine reduzierende Wirkung sichtbar gemacht. Weißes MoO_3 , das am geeignetsten nach dem Verfahren von Wrede vorbereitet ist, wird durch die Einwirkung der Wasserstoffatome zu blauem MoO_2 reduziert. Die Methode war für die vorliegende Untersuchung nicht empfindlich genug und arbeitete zu wenig kontrastreich. Versuche mit einem hochempfindlichen Platinbolometer schlugen aus mannigfachen Gründen fehl. Schließlich wurden Versuche mit der Schumannplatte begonnen, die durch die merkwürdigen Erscheinungen (Schwärzung der Schumannplatte) angeregt werden, die W. Wien¹⁾ bei seinen Leuchtdauermessungen an der Lyman Serie im Vakuumspektrographen beobachtete. W. Wien glaubte aus seinen Beobachtungen und Versuchen schließen zu müssen, daß die starke Schleierbildung der Schumannplatte im Vakuumspektrographen — bei sorgfältiger Vermeidung irgendeiner Lichtwirkung — nur von Wasserstoffatomen hervorgerufen werden könnte, die mit thermischer Geschwindigkeit im Vakuumspektrographen vorhanden sind. Eine exakte Untersuchung darüber sollte noch folgen. Es wurden nun, unter der Annahme der Richtigkeit der von W. Wien aufgestellten Hypothese, Aufnahmen des Auftreffpunktes des Strahles auf die Schichtseite der Schumannplatte und ebenso Aufnahmen durch das Glas der Platte hindurch auf die Schichtseite hergestellt. Sie führten zu einem merkwürdigen Ergebnis. Die Aufnahmen durch das Glas hindurch ergaben das Bild eines feinen Lichtpunktes, wie die geometrische Optik ihn nach den drei Spalten erforderte. Die Aufnahme auf die Schichtseite dagegen ergab bei gleicher Be-

1) W. Wien, Ann. d. Phys. 83, S. 1. 1927; 83, S. 19. 1927.

lichtungszeit ein Bild vier- bis fünfmal größer als die Lichtpunktabbildung und außerdem war das Bild nicht kreisrund, sondern der Rand von strahlenartigen Ausstrahlungen (vgl. Fig. 3a und b) durchbrochen.

Die Belichtungszeiten schwankten zwischen 20 Min. und 2 Stdn. je nach Güte des Rohres und gewünschter Schwärzung. Es ist bei den veröffentlichten Platten der Übersicht wegen



H-Atomstrahl durch die Glasseite
a) einer Schumannplatte aufgenommen
Belichtungszeit $1\frac{1}{2}$ Stdn.



H-Atomstrahl auf die Schichtseite
b) einer Schumannplatte
Belichtungszeit $1\frac{1}{2}$ Stdn.
(Originalgrößen)

Fig. 3

stets die Belichtungszeit angegeben. Die im nachstehenden ausführlich gegebene Beweisführung hat ergeben, daß das zweite Bild tatsächlich die Aufnahme der Wasserstoffatomstrahlen ist, vergrößert durch die leichte Streuung der Wasserstoffatome im Beobachtungsraum. Der unsaubere Rand wurde durch die Reflexion der Wasserstoffatome an den nicht ganz kreisrunden und unebenen Spaltlöchern der Zelloidplatte hervorgerufen. Es ist also festzustellen, daß die Schumannplatte ein vorzügliches Hilfsmittel ist, Wasserstoffatomstrahlen nachzuweisen; hochempfindlich, kontrastreich und außerordentlich angenehm im Gebrauch. Die Schumannplatten wurden von der Firma Adam Hilger in London bezogen.

Für die oben angegebene Feststellung, die zu den Ergebnissen im Teil II dieser Arbeit die Grundlage bildete, ist nun der Beweis zu bringen, der schwer zu führen ist. Denn es mußte mit aller Sicherheit die Möglichkeit ausgeschaltet werden, daß der Effekt von Licht, auch ultraviolettem Licht (Lymanserie) des Entladungsraumes, das außerordentlich stark

ist, herrührt. Durch die oben angegebene Anordnung der Anzapfstelle der Wasserstoffatome, wird zunächst einmal die Stärke des durchscheinenden Lichtes auf ein Mindestmaß beschränkt. Folgende systematischen Versuche beweisen nun die Richtigkeit der oben aufgestellten Behauptung.

a) **Nachweis, daß Wasserstoffatome thermischer Geschwindigkeit die Schumannplatte schwärzen**

Trotz der Versuche von W. Wien erschien es notwendig, diese Frage zuerst noch einmal endgültig zu entscheiden. Fig. 4 zeigt die dazu verwendete Anordnung. Statt den drei Spalten wie sonst, wurden nur zwei verwendet, die einander

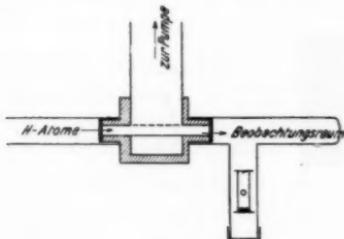


Fig. 4

nicht parallel standen, so daß kein Licht in den Beobachtungsraum gelangen konnte. Außer dieser Anordnung wurde noch ein weites Ansatzrohr an den Beobachtungsraum angeblasen. In dieses Rohr konnte ein kleines Zelluloidrohr eingeführt werden. Dieses Zelluloidrohr, 30 mm lang, 10 mm Durchmesser, war an der einen Seite vakuumdicht durch eine Zelluloidscheibe verschlossen. Die andere Seite konnte mit Hilfe eines Gummipropfens abgedichtet werden. Das Rohr hatte ein kleines Loch von 4 mm Durchmesser. In dieses Rohr wurde abwechselnd eine Platte — mit MoO_3 belegt —, eine Schumannplatte und eine hochempfindliche Gelatineplatte eingelegt, verschlossen, und in das weite Ansatzrohr gebracht. War die Entladung im Gange, so füllte sich der Beobachtungsraum mit einem ganz geringen Druck von Wasserstoffatomen. Mit den eingebrachten Plättchen wurde folgendes festgestellt, unter Variation der Einwirkzeit der Wasserstoffatome. Die Durch-

führung aller drei Versuche geschah stets unter Einhaltung ein und derselben Zeitspanne der Belichtung.

1. Die hochempfindliche Gelatineplatte. Sie zeigte nicht die geringste Spur von Belichtung. Erst nach längerer Einwirkung der Atome (einer halben bis einer Stunde) bildete sich ein ganz geringfügiger Schleier, wahrscheinlich eine Folge der Wirkung der Wasserstoffatome auf die obersten Silberatome der Schicht.

2. Die Plättchen mit MoO_3 zeigten Bläbung, steigend mit der Einwirkzeit, Beginn nach 3—4 Minuten und zwar ohne Bläungsunterschied, ob die Plättchen im kleinen Zelluloidrohr lagen oder außerhalb im großen Glasrohr.

3. Die Schumannplatte war nach einer halben bis einer Minute und darunter vollkommen geschwärzt. Halb mit einer Glasplatte abgedeckte Platten blieben an der Stelle der Glasplatte hell.

Mit diesen Versuchen ist bewiesen, daß die Schumannplatte hoch empfindlich für Wasserstoffatome ist, die mit thermischer Geschwindigkeit sie treffen. Ebenso zeigten die Versuche mit dem MoO_3 -Plättchen in und außerhalb des Zelluloidrohres qualitativ, daß Zelluloid für Wasserstoffatome katalytisch fast vollkommen unwirksam ist.

**b) Die größere Abbildung
auf der Schichtseite der Schumannplatte
wird nicht vom Licht des Entladungsraumes hervorgerufen**

Zuerst sind hier Versuche anzuführen, die nicht absolut beweiskräftig, aber später nach dem endgültigen Beweis als praktische und einfache Kontrollversuche zu benutzen sind. Wie schon oben beschrieben, herrscht ein großer Unterschied zwischen den Aufnahmen auf die Schichtseite der Schumannplatte und denen, die durch das Glas der Schumannplatte hindurch aufgenommen sind. Die Aufnahmen durch die Glasseite ergaben die Abbildung des Lichtpunktes, wie ihn die geometrische Optik fordert. Aufnahmen auf die Gelatineschichtseite einer hochempfindlichen Agfa Isorapid, Hauff Ultrarapid, Kodakplatte ergaben ebenfalls den Lichtpunkt nur stärker und mit Lichthofbildung. Bei der Schumannplatte, die für sichtbares Licht nicht übermäßig empfindlich ist, fällt die Lichthofbildung wegen der Abwesenheit der Gelatine fort. Die

Aufnahmen durch die Glasseite auf eine hochempfindliche Schichtplatte sind mit den direkt auf die Schichtseite der Gelatineplatte aufgenommenen identisch. Es besteht die Möglichkeit, daß die geringfügige Vergrößerung des Lichtpunktes auf der Gelatineplatte außer durch die Lichthofbildung auch durch eine Fluoreszenzwirkung der Gelatine hervorgerufen wird. Es ist nun noch zu beweisen, daß nicht durch irgendwelche ultraviolette Strahlung oder auch durch die Resonanzstrahlung, die im ersten oder gar zweiten Spaltraum durch Einstrahlung der Lymanlinien neu entstanden sein könnte, die große Abbildung auf der Schumannplatte hervorgerufen wird. Daß es ultraviolette Strahlung bis nahe an die Wellenlänge der ersten Lymanlinie nicht sein kann, wurde durch die Vorschaltung eines 1 mm dicken Flußspatplättchens¹⁾ bewiesen. Man erhielt auf der Schichtseite der Schumannplatte sofort die geometrische Abbildung des Lichtpunktes. Ferner — darüber ist später eingehend zu sprechen — erhielt man beim Durchgang der Strahlen durch eine Zelloidfolie, deren Dicke unter $5 \cdot 10^{-5}$ cm lag (sie zeigte keine Interferenzfarben mehr), den gleichen, oben beschriebenen Effekt der Atomstrahlen auf die Schumannplatte, nur noch um vieles größer und mit abnehmender Schwärzung nach außen zum Rande hin. Aufnahmebilder folgen im Teil II. Die Schwärzungen mit und ohne Folie waren bei gleicher Belichtungszeit fast ohne Unterschied. Wurde die Folie, etwas dicker gemacht, erschien nur der Lichtpunkt auf der Schichtseite der Schumannplatte. Die feinsten Folien mit denen später die Aufnahmen über den Durchgang von Wasserstoffatomen gemacht wurden, wurden nun im Vakumspektrographen auf ihre Durchlässigkeit für Lymanlicht geprüft, und es wurde festgestellt, daß die benutzten Folien mindestens im Verhältnis 1:10 das Lymanlicht absorbieren. Nach diesem Ergebnis ist es unmöglich, daß die Schwärzung der Platte, durch die dünnen Folien hindurch, von Lymanlicht hervorgerufen werden kann. Ist die Folie etwas dicker, so geht nur das sichtbare Licht noch hindurch.

1) Die kleinen Bruchstücke der durchsichtigen dünnen Flußspatplättchen wurden uns von der Firma Steinheil & Söhne, München, durch die Liebenswürdigkeit von Hrn. Ingen. Franz zur Verfügung gestellt. Ich möchte ihm auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank aussprechen.

Als Ergebnis ist also festzustellen: der Effekt auf der Schichtseite der Schumannplatte wird nicht durch Licht bis unter die Wellenlänge der Lymanserie herbeigeführt, und die Aufnahmen durch die Glasseite der Schumannplatte und auf die Schichtseite einer hochempfindlichen Gelatineplatte geben das Normalbild des Lichtpunktes; sie geben daher als Kontrollversuche stets ein klares Unterscheidungsmittel zwischen der Lichtwirkung und der Wasserstoffatomwirkung.

**3. Aufnahmen unter Abschirmung des Lichtes
durch eine schwarze Zelluloidplatte**

Um einen endgültigen sicheren Beweis zu bringen, wurde die Anordnung, die in Fig. 1a gezeichnet ist, gewählt. In etwa 3 cm Entfernung vor dem ersten Spalt wurde eine schwarze undurchsichtige Zelluloidplatte angebracht, und es zeigte sich nun, daß der Lichtpunkt bis auf ein ganz geringes Minimum fortfiel. Dieses Minimum konnte wegen Fluoreszenzwirkung und der nicht absoluten Schwärze der Zelluloidplatte nicht entfernt werden. Auf Aufnahmen mit der Schumannplatte durch die Glasseite hindurch, erhielt man erst nach langer Belichtung eine erste Andeutung des Lichtpunktes; während, wenn der Strahl auf die Schichtseite fiel, in der gleichen Zeit, in der auf der hochempfindlichen Gelatineplatte fast nichts vom Lichtpunkt zu sehen war, eine starke Schwärzung der Platte eintrat. Da durch die vorgeschaltete, im Entladungsraum liegende Platte die Intensität der Strahlung herabgesetzt wurde und die Unterscheidung der Lichtwirkung ja einwandfrei erreicht werden konnte, wurde später bei den eigentlichen Versuchen stets ohne die Schirmplatte gearbeitet. Diese trotz Ausschaltung des Lichtes erscheinende starke Schwärzung ist ein eindeutiger Beweis der oben angeführten Behauptung.

Im zweiten Teile dieser Mitteilung werden bei Besprechung der Versuchsergebnisse noch einige weitere Beweise erbracht, die sich aus den Versuchen über den Durchgang von Wasserstoffatomen durch dünne Folien, Durchgang durch Gase und anderem mehr ergaben und die obigen Ausführungen nur noch erhärten. Es ist also der Beweis erbracht, daß die Schumannplatte ein ausgezeichnetes Mittel zum Nachweis von Wasserstoffatomstrahlen ist und daß das Licht, welches durch

die Spalte vom Entladungsraum kommt, nicht abgedeckt zu werden braucht, da die Aufnahmen in sich eine klare Unterscheidung beider Erscheinungen tragen und im übrigen einfache Kontrollversuche, durch Umkehrung der Platte, ein deutliches Bild des Lichtpunktes ergeben. Ebenso ist auf jeder Strahlauflnahme schon die mitentstehende Lichtpunktabbildung sofort durch die wesentliche Überbelichtung der Platte an dieser Stelle zu erkennen.

Zusammenfassung

1. Durch Verwendung von Zelloid wird eine einfache Methode zur Herstellung von Spalten, zur Erzeugung von Wasserstoffatomstrahlen, beschrieben.
2. Es wird dargestellt und bewiesen, daß die Schumannplatte ein ausgezeichnetes Hilfsmittel zum Nachweis von Wasserstoffatomstrahlen ist.

Die Versuche wurden im Physikalischen Institut der Universität München unternommen.

Berlin-Siemensstadt, im April 1929.

(Eingegangen 2. Mai 1929)

Über Versuche an Wasserstoffatomstrahlen

Teil II

Über die Reflexion von Wasserstoffatomen an Kristallen und über den Durchgang der Atome durch dünne Folien

Von Hans Kerschbaum

(Mit 7 Figuren)

Im ersten Teil der Mitteilung über Versuche an Wasserstoffatomstrahlen, der in diesen Annalen¹⁾ erschien, ist im wesentlichen die experimentelle Anordnung zur Herstellung der Atomstrahlen und die günstigste Auffangmethode eingehend besprochen worden. Es soll nun über die Ergebnisse der Versuche, die mit dieser Anordnung gewonnen wurden, berichtet werden. Die Versuche konnten leider nicht so weit, wie sie geplant waren, ausgedehnt werden, da äußere Umstände zu einem vorzeitigen Abbruch zwangen. Die mitgeteilten Ergebnisse sind jedoch — außer es ist ausdrücklich vermerkt — in vielen Versuchen eingehend beobachtet und nach Möglichkeit sichergestellt.

1. Über die Reflexion von Wasserstoffatomen an Kristallen

Über die Reflexion von Atomen, speziell Wasserstoffatomen, an Kristallen sind schon mehrere Arbeiten erschienen. Von einer Beschreibung der Reflexionsversuche²⁾, die mit Kanalstrahlen angestellt wurden, soll abgesehen werden, da die Atome viel zu große Geschwindigkeit hatten, um zur Prüfung der Formel von De Broglie eine Möglichkeit zu bieten. Die ersten Versuche über die Reflexion von langsamem Atomen haben — zwar ohne klares Ergebnis —

1) H. Kerschbaum, Ann. d. Phys. [5] 2. S. 201. 1929.

2) J. Stark und W. Steubing, Phys. Ztschr. 28. S. 995. 1909; H. Wilsar, Ann. d. Phys. 39. S. 1292. 1912; E. Wagner, Ann. d. Phys. 41. S. 214. 1913.

R. W. Wood¹⁾ und Langmuir²⁾ angestellt. Nach Bekanntwerden der ersten theoretischen, wellenmechanischen Forderungen und den experimentellen Ergebnissen der Elektronenversuche sind verschiedene Arbeiten über die Reflexion von Atomen entstanden. Die Arbeiten über die Reflexion von Ionen³⁾ an Kristallen sollen nur erwähnt, aber nicht ausführlich beschrieben werden, da sie merkwürdige und noch nicht ganz zu übersehende Ergebnisse hatten, die aber wahrscheinlich eine Folge der Ladung der Atome sind. In dieser Arbeit handelt es sich aber um neutrale Atome. Die Arbeiten über die Reflexion von neutralen Atomen thermischer Geschwindigkeit gaben im wesentlichen folgendes Ergebnis: Cadmium-, Quecksilber-, Natrium-⁴⁾, Arsen⁵⁾-Atome werden von Steinsalz regelmäßig reflektiert. Einfallswinkel und reflektierter Winkel sind gleich in bezug auf die Normale zum Kristall. Ellet und Zahl fanden außer der regelmäßig reflektierten Strahlung noch diffuse Strahlung, die bei einigen Kristallen größer ist, als die regelmäßig reflektierte Strahlung.

A. Ellet und H. F. Olson stellen mit Hilfe eines rotierenden Sektors in einer kurzen Notiz fest, daß fast alle Cadmiumatome eines von Steinsalz reflektierten Strahles ungefähr die gleiche Geschwindigkeit haben und daß die Geschwindigkeit variiert mit dem Einfallswinkel, dagegen unabhängig ist von der Temperatur des Kristalles. Über Versuche der Reflexion von Wasserstoffatomen liegen zwei kurze Angaben vor, die noch kein klares Bild ergeben. A. Ellet und Olson⁶⁾ ließen Wasserstoffatome auf Steinsalz fallen unter einem Winkel von 45°. Sie stellten fest, daß reflektierte Wasserstoffatome den Kristall verließen. Jedoch ließ sich der Reflexionswinkel nicht genau bestimmen. Außerdem soll die Reflexion wesentlich abhängig sein von den einzelnen Kristallen. Th. H. Johnson⁷⁾ veröffentlichte eine kurze Notiz über Reflexion von Wasserstoff-

*mit steinsalz
reflektiert*

- 1) R. W. Wood, Phil. Mag. **30**. S. 300. 1915.
- 2) I. Langmuir, Phys. Rev. **8**. S. 149. 1916.
- 3) R. W. Gurney, Phys. Rev. **32**. S. 467. 1928; George E. Read, Phys. Rev. **31**. S. 629. 1928.
- 4) A. Ellet u. H. F. Olson, Phys. Rev. **31**. S. 643. 1928.
- 5) A. Ellet u. H. A. Zahl, Phys. Rev. **33**. S. 124. 1929.
- 6) A. Ellet und H. F. Olson, Phys. Rev. **33**. S. 118. 1929.
- 7) Th. H. Johnson, Phys. Rev. **31**. S. 1122. 1928.

atomen an Steinsalzkristallen und einer Eisfläche. Frisch gespaltenes Steinsalz soll intensiv reflektieren, wobei der Reflexionswinkel gleich dem des einfallenden Strahles ist. Kristallquarz und frisch gespaltene Calcite sollen nicht in ausgezeichneter Richtung reflektieren.

Nach Abschluß vorliegender Arbeit ist eine neue Arbeit über die Reflexion von Molekularstrahlen an Kristallen von F. Knauer und O. Stern¹⁾ erschienen. Es wird über Reflexionsversuche von H_2 , Ne, He Molekularstrahlen an einem Strichgitter und an Kristallflächen (besonders Steinsalz) berichtet. Die Versuche an einem Strichgitter ergaben noch keine eindeutigen Ergebnisse. Bei der Reflexion an Kristallflächen finden die Verfasser eine Abhängigkeit des Reflexionsvermögens vom Einfallswinkel und der Temperatur des Strahles, in dem Sinne, daß bei kleinen Einfallswinkeln die Reflexion um so besser ist, je höher die Temperatur des Strahles war. Weiter wird die Intensität des reflektierten Strahles in Abhängigkeit vom Einfallswinkel gemessen. Bei He wurde ein besonderes Intensitätsmaximum ungefähr an der Stelle des Beugungsmaximums 1. Ordnung (nach der Gleichung von L. de Broglie bestimmt) gefunden. Bei H_2 und Ne wurden keine ausgeprägten Beugungsmaxima festgestellt. Die Verf. schließen aus diesen Befunden, daß die Reflexion der Molekularstrahlen den Gesetzen der Wellentheorie der Materie folgt.²⁾

Die in der vorliegenden Arbeit mitgeteilten Ergebnisse geben zum Vergleich bei den Reflexionsversuchen leider keine genauen quantitativen Intensitätsmessungen wieder. Die Aufnahmen über den Durchgang von H-Atomen durch dünne Häutchen stehen bis jetzt jedoch nicht mit den Forderungen der Wellentheorie der Materie in Einklang.

Mit der experimentellen Anordnung, wie sie in Teil I, Fig. 1a beschrieben ist, wurden die Versuche über die Reflexion von Wasserstoffatomen angestellt. In dem Beobachtungsraum wurde dem Strahl unter $45-50^\circ$ und $5-10^\circ$ eine Platte, auf die der reflektierende Kristall aufgebracht wurde, entgegen gestellt. Der reflektierte Strahl wurde auf der Schumannplatte

1) F. Knauer und O. Stern, Ztschr. f. Phys. 53, S. 779. 1929.

2) Anm. bei der Korrektur: vgl. Notiz in den Naturwissenschaften 7, S. 391. 1929.

aufgefangen. Strahlenweg vom letzten Spalt betrug etwa 14 bis 17 cm. Frisch gespaltener Glimmer, Gips und peinlichst gereinigte und polierte Zelluloidplatten reflektierten genau unter dem Einfallswinkel. Steinsalz war nicht so günstig für die Reflexion, da seine Oberfläche viel schwerer sauber zu erhalten ist. Die Abbildungen erschienen verzerrt, wohl durch die Unebenheiten des Kristalles genügend erklärt.



Reflexion von H-Atomen an Zelluloid (45°)
Belichtungszeit 2½ Stdn.

Fig. 1



Reflexion von H-Atomen an Glimmer (45°)
Belichtungszeit 2½ Stdn.

Fig. 2



Reflexion von H-Atomen an Glimmer (8°)
Belichtungszeit 1 Std.

Fig. 3

(Originalgrößen)

Figg. 1—3 zeigen die Reflexionsaufnahmen an Zelluloid und Glimmer unter verschiedenen Winkeln. Es ist noch zu bemerken, daß bei öfterer Reflexion auf die gleiche Stelle des Kristalles, besonders bei Gips, anscheinend durch Zerstörung der Oberfläche, die reflektierte Intensität wesentlich abnahm, und bei Gips trat oft eine Trübung des Kristalles ein. Die Belichtungsdauer betrug zwischen 1½—2 Stdn. Der gleichzeitig mitabgebildete Lichtpunkt war nach dieser Aufnahmzeit bei Gips und Glimmer noch kaum wahrnehmbar. Qualitativ wurde ein Unterschied zwischen der Schwärzung des direkten Strahles und der des reflektierten Strahles nicht wahrgenommen. Genaue Messungen darüber konnten nicht unternommen werden.

Es wurden noch Versuche angestellt von einem Gelatinestrichgitter (900 Striche pro Millimeter) unter einem Einfallswinkel von $\sim 10^\circ$ Reflexion zu erhalten. Doch wurde bei den wenigen Aufnahmen, zu denen die Zeit reichte, außer einer ganz diffusen Streuung kein Resultat erzielt. Es ist wahrscheinlich, daß das Gitter zerstört wird, da die Auftreffstelle natürlich rauh, somit nach der Erfahrung besonders katalytisch wirksam ist. Es müßten deshalb die Versuche mit einem besonders geeignet hergestellten Zelluloidgitter wiederholt und ausgebaut werden.

Aus diesen Reflexionsversuchen¹⁾, in Verbindung mit den Ergebnissen der von anderen Forschern ausgeführten Beobachtungen geht hervor, daß bis jetzt die Andeutung von Beugungsscheinungen, wie sie nach der Wellenmechanik als wahrscheinlich angenommen werden, nicht gefunden wurde, sondern eine reguläre Reflexion vorherrscht.

2. Durchgang von Wasserstoffatomen durch dünne Folien

Ein überraschendes Ergebnis bildeten die Versuche über den Durchgang von Wasserstoffatomen durch dünne Zelluloidfolien und Glimmerscheiben. Die Dicke der Folien betrug unter $5 \cdot 10^{-5}$ cm. Die Folien zeigten keine Interferenzfarben mehr. Die Glimmerfolien wurden durch plötzliches Abreißen, die Zelluloidfolien auf Wasser hergestellt, auf einer Zelluloidplatte aufgefangen und getrocknet. Auf die Möglichkeit des Durchgangs von Wasserstoffatomen durch dünne Folien wies die Beobachtung hin, daß der Schleier²⁾ im Vakumspektrographen auch unter der Zelluloidfolie vorhanden war, während er unter der Fassung, die aus einem breiten Streifen dickeren Zelluloids bestand, der einen Abstand von 1 mm von der Platte hatte, ausblieb. Auch MoO_3 wurde durch die Zelluloidhaut hindurch im mit Wasserstoffatomen gefüllten Raum gebläut, dagegen nicht unter der fest aufliegenden Zelluloidfassung.

Die Strahlenaufnahmen durch dieselben Folien, die vorher im Vakumspektrographen auf ihre Durchlässigkeit für das Lymanlicht geprüft waren (vgl. Teil I), ergaben die Abbildung des Strahlenpunktes gegenüber derjenigen des direkten Strahles

1) Vgl. Zusatz in der Einleitung.

2) Vgl. Teil I.

um das Doppelte vergrößert. Die Intensität der Schwärzung nahm nach dem Rande zu ab.

Figg. 4 und 5 geben solche Aufnahmen wieder. Mit zwei verschiedenen Häutchen und unter Zeitvariation hergestellte Kontrollversuche wurden teils vor, teils nach der Streuaufnahme, unter gleichen Belichtungszeiten wie die Streuauf-

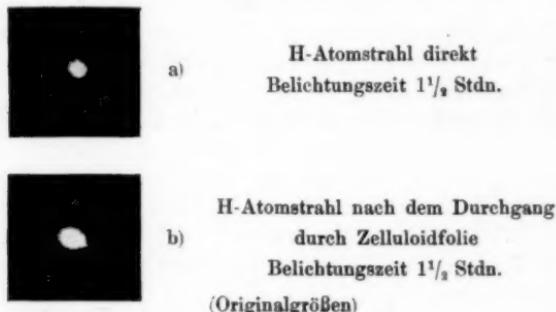


Fig. 4

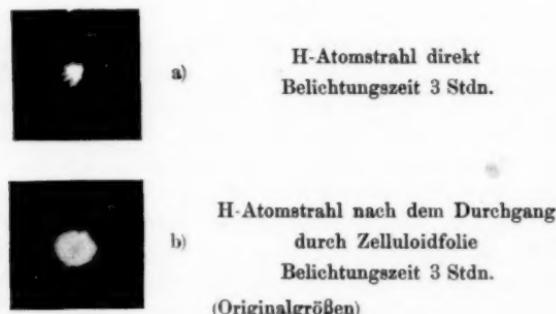


Fig. 5

nahmen, unternommen und zwar auf die Schichtseite und durch die Glasseite einer Schumannplatte und auf die Schichtseite hochempfindlicher Gelatineplatten. Ebenso wurden Streuaufnahmen auf hochempfindliche Gelatineplatten als Kontrollversuche angestellt (Lichtpunktabbildung).

Fig. 6 zeigt eine Aufnahme, bei der das Häutchen zu dick war. Es zeigte gerade die ersten Interferenzfarben. Die H-Atome wurden fast ganz absorbiert! Die Belichtungszeiten

wurden zwischen $1\frac{1}{2}$ —4 Stdn. variiert. Eine Änderung des Abstandes der Platte von dem streuenden Häutchen von 4 bis 7 cm zeigten keine Änderung des Ergebnisses. Die Aufnahmen an Glimmer waren nicht so günstig. Die Wasserstoffatome wurden bei der erreichten Dünne der Folie doch schon stark absorbiert. Es wurde aber deutlich ein Durchgang festgestellt.



a)

H-Atomstrahl direkt
Belichtungszeit 1 Std.



b)

H-Atomstrahl, Zelluloidfolie zu dick
Belichtungszeit 2 Stdn.

(Originalgrößen)

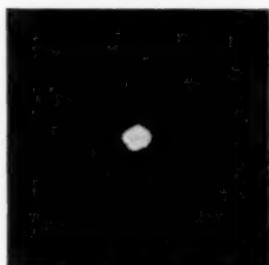
Fig. 6

Das Ergebnis dieser Versuche ist, daß die Wasserstoffatome durch dünne Folien hindurchgehen, unter regelmäßiger Streuung. Die Andeutung von ausgezeichneten Richtungen (Beugungerscheinungen), wie sie bei den Elektronenversuchen von G. P. Thomson (ebenfalls an Zelluloid) und Rupp festgestellt worden sind, konnten nicht beobachtet werden.

3. Über den Durchgang von Wasserstoffatomen durch Gase

Es ist zum Schluß noch auf eine Beobachtung hinzuweisen, der weiter nachzugehen, leider nicht mehr möglich war. Es ist bekannt, und auch Wrede berichtet darüber, daß die Wasserstoffatomstrahlen schon durch Drucke von 0,001 bis 0,005 mm Quecksilberdruck und weniger im Beobachtungsraum vollkommen diffus zerstreut werden. Auch die Aufnahmen mit der Schumannplatte zeigten dasselbe Ergebnis. Die Platten wurden bei Drucken von 0,001 mm Quecksilberdruck schwarz, ohne Ausbildung einer Atomstrahlabbildung. Ließ man aber in dem Beobachtungsraum Neon einströmen anstatt Luft, so zeigte sich das merkwürdige Ergebnis, daß selbst bei 0,0014 mm Quecksilberdruck eine scharfe Abbildung des Atomstrahles sich zeigte. Nur waren die Ränder in merkwürdiger Weise unscharf.

Fig. 7 gibt eine Aufnahme des Bildes des Atomstrahles gestreut in 0,0014 mm Quecksilberdruck Neon wieder. Es ist auf der Reproduktion leider nicht genau zu sehen, wie die Schwärzung nach den Rändern zu abnimmt, und die Ränder selbst merkwürdig gezackt erscheinen. Die Bilder bei einem



H-Atomstrahl gestreut in Neon
0,0014 mm Hg Neon
(Vergrößerung 2 : 1)

Fig. 7

Druck von 0,0007 mm Quecksilberdruck und 0,0014 mm Quecksilberdruck waren einander nicht gleich. Weitere Beobachtungen liegen über diese Erscheinung leider nicht vor.

Zusammenfassung

1. Es werden Reflexionsversuche von Wasserstoffatomen thermischer Geschwindigkeit an Glimmer, Gips und Zelloid mitgeteilt in zwei verschiedenen Winkelbereichen (45—50° und 5—10°). Es wurde gefunden, daß der Einfallswinkel des Strahles gleich dem Reflexionswinkel ist, bezogen auf die Normale zum Kristall.

2. Die Abbildungen des Wasserstoffatomstrahles nach dem Durchgang durch dünne Zelloid- und Glimmerfolien zeigten nur eine unregelmäßige Streuung in der Folie.

3. Es werden unvollständige Beobachtungen über den Durchgang von Wasserstoffatomen durch Neon unter bestimmten Drucken mitgeteilt.

Die Versuche wurden im Physikalischen Institut der Universität München ausgeführt.

Berlin-Siemensstadt, im April 1929.

(Eingegangen 2. Mai 1929)

*Über das Verhalten
verschiedener organischer Dämpfe
in der Hochfrequenz-Glimmentladung*

Von E. Hiedemann

(Nachtrag zu der Arbeit: Über die Hochfrequenz-Glimmentladung in Wasserstoff. Ann. d. Phys. 85. S. 649. 1928)

Der durch ein glühendes Palladiumrohr eingeleitete Wasserstoff wird auf Reinheit untersucht und diese auch unter ungünstigen Bedingungen festgestellt. Die Entladungsscheinungen in Dämpfen von Äther, Äthylalkohol, Aceton, Eisessig, Chloroform, Tetrachlorkohlenstoff und Benzol werden beschrieben. Die Entladungsprodukte aus Benzoldampf in verschiedenen Arten der elektrischen Entladung werden als Diphenyl, Biphenylen und höhere Isomere festgestellt.

Gelegentlich einer Untersuchung über die Hochfrequenz-Glimmentladung in Wasserstoff¹⁾ war dem Verf. folgende Erscheinung aufgefallen: Wurde der verwendete Wasserstoff durch ein glühendes Palladiumrohr aus einer Wasserstoff- oder Leuchtgasflamme eingeleitet, so ließen nach längerem Betrieb die Entladungsröhren braun an. Eine analytische Prüfung zeigte, daß dieser Niederschlag zum größten Teil aus Kohlenstoff bestand. Spätere Untersuchungen zeigten, daß der Niederschlag aus einem sehr hochpolymerisierten Kohlenwasserstoff bestehen mußte. Es war ein fester hell- bis dunkelbrauner Körper, der in allen gebräuchlichen organischen Lösungsmitteln unlöslich war und der Kohlenstoff in hohem und Wasserstoff in sehr geringem Prozentsatz enthielt. Eine genauere Definiton des Körpers war zunächst nicht möglich. Die genannte Untersuchung wurde dann mit Anwendung einer elektrolytischen Wasserstoffentwicklung beendet, wobei sich dann kein Niederschlag mehr zeigte. Bei der Bedeutung, die die Wasserstoffeinleitung durch ein glühendes Palladiumrohr in eine Vakuum-

1) E. Hiedemann, Ann. d. Physik 85. S. 649. 1928.

apparatur für sehr viele experimentelle Arbeiten hat, erschien es notwendig, in einer besonderen Untersuchung festzustellen, ob diese Art der Wasserstoffeinleitung zuverlässig ist, oder ob sie unter besonders ungünstigen Umständen nicht mehr verwendbar ist. Die Apparatur wurde nun in einem anderen Raum aufgebaut, da sie zuerst aus Raummangel in dem — auch als Chemikalienlager dienenden — Vorbereitungszimmer des Instituts untergebracht werden mußte, dessen Luft natürlich mit vielen Dämpfen verunreinigt war. Zunächst wurden Palladiumrohre verschiedener Herkunft (von Gundelach und von Burger & Co), die an eine der üblichen Vakuumapparaturen mit verschiedenen Entladungsrohren angeschmolzen waren, in einer reinen Wasserstoffflamme geglüht, und der in die Apparatur eintretende Wasserstoff genau auf Reinheit untersucht. Es zeigte sich kein Niederschlag, auch nicht bei wochenlangem Betrieb der Entladungsrohre. Ferner zeigte eine genaue spektroskopische Untersuchung eine völlige Reinheit des Wasserstoffes. Als zweites Kriterium für die Reinheit des Wasserstoffes wurde dann die Schichtung mit einem Innenelektrodenrohr bei Betrieb mit Wechselstrom und auch mit pulsierendem Gleichstrom untersucht. Es wurde in den entsprechenden Stromdruckbereichen immer die von Neubert¹⁾ entdeckte rote Schichtung gefunden, die nach Neubert (a. a. O.) nur bei größter Reinheit des Wasserstoffes auftritt. Lange Versuchsreihen ergaben immer wieder als Ergebnis die völlige Reinheit des durch das Palladiumrohr eingeleiteten Wasserstoffes im Einklang mit den Ergebnissen von Neubert (a. a. O.) und Oldenberg²⁾. Offenbar ist also diese Wasserstoffeinleitung völlig einwandfrei und zuverlässig. Es wurden nun anormal ungünstige Bedingungen hergestellt, um zu prüfen, ob auch unter diesen der eingeleitete Wasserdampf noch rein war. Zu diesem Zwecke wurde künstlich die Umgebung des glühenden Palladiumrohres verunreinigt. Zuerst wurde statt einer Wasserstoffflamme eine Leuchtgasflamme benutzt. Nach vielstündigem Betrieb war keine Spur eines Niederschlages zu finden; dagegen war das Palladiumrohr in der von Neubert³⁾ beschriebenen Weise

1) P. Neubert, Ann. d. Phys. 42. S. 1454. 1913.

2) O. Oldenberg, Ztschr. f. Phys. 41. S. 1. 1927.

3) P. Neubert, Diss. Leipzig 1913.

unbrauchbar geworden, da starke Kohleabscheidung mit nachfolgender Aufrauhung der Oberfläche und Verschlechterung der Diffusion stattgefunden hatte. Darauf wurde das Palladiumrohr in Wasserstoff- und auch in Leuchtgasflammen geglüht, die nacheinander mit den Dämpfen von Benzol, Äther, Äthylalkohol und Aceton karburiert wurden. Trotz tagelangen Einleitens des Wasserstoffes durch das Palladiumrohr zeigte sich keine Spur eines Niederschlages und auch die Entladungsscheinungen wiesen auf reinen Wasserstoff hin. Bei diesen Versuchen sonderte sich natürlich besonders stark Kohlenstoff auf dem Palladiumrohr ab, so daß von Zeit zu Zeit mit Druckluft der Kohlenstoff entfernt werden mußte, da eine andere Reinigungsart das Rohr zu leicht hätte beschädigen können. Wenn die Rohre später vorsichtig mit Lösungsmitteln gereinigt worden waren, so war die Aufrauhung der Oberfläche besonders stark zu bemerken. Vielleicht wird diese Veränderung der Oberfläche sowie die Verschlechterung der Diffusion durch eine Karbidbildung auf der Oberfläche verursacht. Es ist also sogar unter extrem ungünstigen Umständen die Einleitung des Wasserstoffes durch ein glühendes Palladiumrohr noch zulässig. Eine Diffusion von Verunreinigungen erscheint mir nach den Versuchen mit den karburierten Flammen sehr unwahrscheinlich. Allerdings wurden bei diesen Versuchen nur neue Palladiumrohre verwendet, während für die zitierte Untersuchung vorhandene ältere Palladiumrohre benutzt worden waren, die zwar vom Verf. auf Dichtheit bei normaler Temperatur geprüft worden waren, die aber vielleicht doch durch evtl. frühere Benutzung ihre Struktur so verändert hatten, daß sie im glühenden Zustand nicht mehr einwandfrei waren. Die Möglichkeit einer solchen Strukturveränderung von Palladiumrohren, bedingt durch Alter oder Vorgeschichte des Rohres, würde auch eine sehr weit zurückliegende Beobachtung von Graham¹⁾ erklären, der fand, daß durch ein Palladiumrohr von 1 mm Wandstärke schon bei gewöhnlicher Temperatur Äther diffundierte. Bei einem neuen Palladiumrohr ist das jedenfalls nicht der Fall. Es wurde bei normaler Temperatur ein an ein hochevakuiertes Entladungsrohr angeschmolzenes Palladiumrohr in eine Atmo-

1) Th. Graham, Pogg. Ann. 129. S. 595. 1866.

sphäre von Ätherdampf eingebracht, später sogar in ein Gefäß mit Äther getaucht, ohne daß auch nur eine Spur von Dampf in das Entladungsrohr drang. Wenn aber auch die Untersuchung von Graham und die zitierte auf die Möglichkeit einer solchen Strukturveränderung der Palladiumrohre hinzuweisen scheinen, so ist sie jedenfalls sehr sehr selten, da sie sonst bestimmt häufiger beobachtet worden wäre. Falls die Strukturveränderung wirklich auftritt, so möchte ich vermuten, daß sie von einer bestimmten Vorgeschichte des Rohres abhängig ist und vermutlich kurz vor dem Undichten werden des Palladiumrohres auftritt. Die bei der ersten Untersuchung benutzten Palladiumrohre wurden nämlich, als sie jetzt genau geprüft werden sollten, nach ganz kurzer Zeit undicht. Sei es nun, daß der Dampf, welcher bei der ersten Untersuchung den Niederschlag im Entladungsrohr verursacht hatte, durch eine Strukturveränderung des Palladiumrohres durch dieses eingedrungen war, sei es, daß er auf einem anderen Wege — obwohl dies bei den angewandten Versuchsbedingungen noch weniger möglich erscheint — in die Apparatur gelangt war, auf jeden Fall schien es von Interesse festzustellen, um welchen Dampf es sich gehandelt hatte. Dies sollte durch Reproduzieren des beobachteten Niederschlages festgestellt werden.

Es wurden daher diejenigen Dämpfe, welche in dem zuerst benutzten Raum mit Sicherheit in großer Menge vorhanden waren, direkt in die Apparatur eingeführt. Es wurden nun wieder hochfrequente Schwingungen an die Entladungsrohre angelegt und das Verhalten dieser Dämpfe im Hochfrequenzfelde qualitativ untersucht, wobei besonders auf die gebildeten Niederschläge geachtet wurde. Das Einleiten der Dämpfe geschah in folgender Weise: Die Flüssigkeiten wurden in einen Glaskolben gebracht und dann der Kolben an die Apparatur angeschmolzen. Nun wurde mittels einer Gaedekapselpumpe und einem Vollmeraggregat die Apparatur so schnell ausgepumpt, daß die Flüssigkeit in dem Kolben gefror. Dann wurde ein Dewargefäß mit flüssiger Luft über den Kolben geschoben und nun die Apparatur auf Hochvakuum ausgepumpt. Der Dampfdruck wurde dann dadurch eingestellt, daß verschiedene Kältebäder für den Kolben Verwendung

fanden. Es konnte so im strömenden Dampf bei dauerndem Abpumpen gearbeitet werden. Bei den Untersuchungen über die Entladungerscheinungen wurde aber zum größten Teil der Einfachheit halber so verfahren, daß nur wenig Flüssigkeit eingeführt wurde. Dann wurde die Apparatur so lange ausgepumpt, bis keine Flüssigkeit, sondern nur noch Dampf von etwa 10 mm Druck vorhanden war. Der Druck wurde an einem kleinen einfachen Quecksilbermanometer abgelesen. Dann wurde die Hochfrequenzspannung auf die Entladungsrohre geschaltet und die Entladungerscheinungen beobachtet. Dann wurde etwas mehr abgepumpt, der Druck abgelesen, wieder Spannung an die Röhre gelegt, wieder die Entladungerscheinung beobachtet usw. Bei diesem Verfahren ist natürlich der Nachteil vorhanden, daß, sobald sich Zersetzungspprodukte durch die Entladung bilden, der Prozentsatz an Zersetzungspprodukten bei jeder Beobachtung ein anderer ist und mit jeder Beobachtung zunimmt. Da aber die Entladung immer nur ganz kurze Zeit durch die Röhre ging, und es sich ferner nur um orientierende qualitative Beobachtungen handelte, so konnte dies Verfahren unbedenklich angewendet werden. Bei Verwendung von Außenelektroden bestand das Entladungsrohr aus einem Glasrohr von 30 mm lichter Weite und etwa 30 cm Länge, an das im Abstand von 10 cm zwei Außen-elektroden in Gestalt von zwei geschlitzten Messingringen von 5 mm Höhe angelegt waren. Das Entladungsrohr für Innen-elektroden hatte die gleiche lichte Weite von 30 mm und zwei Aluminiumelektroden in Form zweier Kreisscheiben von 20 mm Durchmesser und einem Abstand von 10 cm. Als Hochfrequenzgenerator wurde, wenn nicht besonders anders erwähnt, der an einer anderen Stelle¹⁾ beschriebene Röhrensender benutzt. Die Entladungerscheinungen seien im folgenden kurz beschrieben:

Aether

Es wurde Ätherdampf im Außenelektrodenrohr untersucht. Bei 3 mm setzte die Entladung ein. Bei 2,5 mm Druck ist die positive grüne Säule voll entwickelt. Man erkennt Faradayschen Dunkelraum und blaues Glimmlicht. Die hellgrüne

1) E. Hiedemann, Ann. d. Phys. 85. S. 649. 1928.

positive Säule zeigt Doppelschichten. Es ist starke Fluoreszenz zu beobachten. Die Doppelschichten befinden sich zuerst in lebhafter Bewegung, was auf den starken Zersetzungsvorgang hinweist. Das ganze Verhalten der Schichtung, wie auch ihre Art zeigen, daß sie durch den freigewordenen Wasserstoff bedingt sind. Bei weiterer Verdünnung verkürzt sich die positive Säule, das Glimmlicht wird intensiver und breitet sich weiter aus. Bei 1,2 mm sieht man vier Doppelschichten und starke seegrüne Fluoreszenz. Bei weiterer Verdünnung schiebt die positive Säule weiter in die Apparatur hinein. Starke Fluoreszenz, die an den Glasteilen zu erkennen ist, die von der positiven Säule eingenommen werden. Überhaupt gilt immer, daß die Fluoreszenz nur in der Umgebung des positiven Lichtes zu sehen ist. Bei 1 mm zwei Doppelschichten. Das Glimmlicht beginnt eingeschnürt zu werden. Bei 0,7 mm nur noch eine Doppelschicht. Läßt man den Äther im Strömungsverfahren durch das Entladungsrohr strömen, so ist die positive Säule nicht hellgrün, sondern gelbgrün. Bei längerem Durchströmen zeigt sich ein schwarzer Kohlenstoffniederschlag. Der Entladungsverlauf zeigt also nichts von Interesse, da die Zersetzung des Äthers und dadurch Freiwerdung des Wasserstoffes vorauszusehen war und der schwarze Kohlenstoffniederschlag sicher nicht mit dem gesuchten braunen Niederschlag identisch war.

Äthylalkohol

Es wurde daher nun Äthylalkohol im Außenelektrodenrohr untersucht. Bei 8,5 mm war eine starke fahlgrüne positive Säule zu erkennen, der Faradaysche Dunkelraum war noch nicht zu erkennen. Starke Fluoreszenz. Bei 8 mm beginnt wasserstoffähnliche Doppelschichtung. Bei 4 mm ist der Faradaysche Dunkelraum zu sehen, hellblaues negatives Glimmlicht und 6 Paar fahlgrüne Doppelschichten. Der weitere Entladungsverlauf ist der übliche. Bei längerem Betrieb entsteht ein starker brauner Niederschlag. Dieser Niederschlag ist aber seiner ganzen Art nach nicht identisch mit dem gesuchten. Die Art der Entladung war offenbar wieder durch den freigewordenen Wasserstoff bedingt und nicht weiter von Interesse.

Aceton

Aceton wurde im Außenelektrodenrohr untersucht. Bei einem Druck von 5 mm war die blaugrüne positive Säule, die die typische Wasserstoffdoppelschichtung zeigte, voll ausgebildet. Der Faradaysche Dunkelraum war sehr deutlich. Die Fluoreszenz war blaugrün. Das Glimmlicht war blau. Der Entladungsverlauf bei weiterer Verdünnung ist der übliche uninteressante. Der Niederschlag war sehr gering und nicht der gesuchte. Das Freiwerden des Wasserstoffes durch die Zersetzung findet also auch hier, wie vorauszusehen, in starkem Maße statt.

Eisessig

Es wurde dann Eisessig untersucht. Bei einem Druck von 3 mm war die positive hellgrüne Säule voll ausgebildet. Ebenso der Faradaysche Dunkelraum. Das Glimmlicht war grünblau. Matte Fluoreszenz war vorhanden. Bei 1 mm waren 8 Doppelschichten deutlich zu erkennen. Die Art der Bildung der Doppelschichten lässt wieder den Zersetzungsvorgang erkennen. Bei weiterer Verdünnung ist der Entladungsverlauf der übliche. Der minimale Niederschlag war nicht der gesuchte.

Chloroform

Bei der Entladung in Chloroform ist der Zersetzungsvorgang so ausgesprochen und geradezu an den Entladungsercheinungen zu sehen, daß hier die Erscheinungen in extenso beschrieben werden sollen. Zunächst im Außenelektrodenrohr: Bei etwa 3 mm schießen aus der nicht geerdeten Elektrode tiefblaue Lichtfäden. Bei weiterer Verdünnung wachsen die Fäden, bis die zweite Elektrode erreicht wird. Jetzt tritt Bildung der positiven Säule ein, die eine rotblaue Mischfarbe zeigt. Der übrige Teil der Röhre ist von grünblauem Leuchten erfüllt. Bei weiterer Verdünnung bis etwa 1 mm wird das grünblaue Leuchten sehr intensiv. Die positive Säule zeigt deutlich diffuse und sich bewegende Schichtenbildung. Bei noch weiterer Verdünnung ist das ganze Rohr von einem intensiven blaugrauen Leuchten erfüllt. Die positive Säule zeigt flackernde, wolkige Schichtenbildung. Fluoreszenz kaum bemerkbar. Bei noch tieferen Drucken beginnt die Schlauch-

bildung, wobei die Einschnürungsstellen ganz von rötlich-gelbem Licht erfüllt sind, immer noch wolkige und flackernde Schichten. Bei noch weiterer Verdünnung verschwindet die wolkige Schichtung immer mehr. Das rotgelbe Glimmlicht bedeckt oben und unten die Außenelektroden genau an den Stellen, an denen kein brauner Niederschlag ist. Im Innen-elektrodenrohr verlaufen die Erscheinungen sehr ähnlich. Bei einem Druck von 3 mm hat sich die rotviolette positive Säule gebildet. Die Elektroden sind von blaugrünem Glimmlicht bedeckt. Bei weitergehender Verdünnung wird das Glimmlicht stärker und umgibt überall die positive Säule. Bei 1 mm Druck zeigt sich diffuse Schichtenbildung. Bei etwa 0,5 mm ist der Raum zwischen den Elektroden von einem intensiven grau-weißen Leuchten erfüllt. Über und unter den Elektroden fahles, grünes Leuchten. Bei noch tieferem Druck sind die Elektroden von einem blauvioletten Glimmlicht bedeckt, das übrige Leuchten wird von den Elektroden abgestoßen und ist intensiv fahlgrün mit wolkig diffuser Schichtenbildung. Das blauviolette Glimmlicht wächst an, das fahlgrüne Licht wird schwächer usw. Tiefbrauner Niederschlag an dem Rohr, besonders scharf in gleicher Höhe über und unter den Elektroden. Der Niederschlag ist bei gleichem Stromdurchgang viel stärker als bei Außenelektroden. Der Niederschlag ist aber nicht der gesuchte.

Tetrachlorkohlenstoff

Bei einem Druck von 1,5 mm in einem Außenelektrodenrohr erkennt man eine sehr lichtstarke kupfergrüne positive Säule. Starke Fluoreszenz. Faradayscher Dunkelraum sehr verwischt. Nach einigen Sekunden wird die positive Säule flackernd geschichtet, wobei die Farbe nach fahlgrün umschlägt. Bei weiterer Verdünnung wird das Licht intensiver fahlgrün, immer noch flackernde Schichten. Bei noch tieferem Drucke zeigt sich ein gelbrotes Glimmlicht an den Elektroden und immer noch flackernde Schichtung usw. Es sei ausdrücklich bemerkt, daß die Schichtung bei Chloroform und bei Tetrachlorkohlenstoff keine Doppelschichtung, sondern eine Einzelschichtung von derselben Art ist, wie sie z. B. bei sehr feuchter Luft auftritt. Es zeigte sich nur ein sehr schwacher schwarzer Niederschlag.

Benzol

Als letzter Dampf wurde dann Benzol zunächst in einem Außenelektrodenrohr untersucht. Bei etwa 3 mm setzt die Entladung ein, starkes rotgelbes negatives Glimmlicht; außergewöhnlich starke Fluoreszenz. Die positive Säule ist bläulich. Bei weiterer Verdünnung bis auf 0,5 mm geht die positive Säule ohne scharfe Grenze in das negative Glimmlicht über; dagegen schießt die positive Säule, die die rosablaue Wasserstofffarbe hat, in die Apparatur hinein, wobei die anliegenden engeren Glasmäntel blaugrün und die weiteren hellgrün fluoreszieren. Bei schwacher Stromstärke kann man die charakteristische letzte Doppelschicht erhalten. Das Entladungsbild ändert sich sofort bei Einschaltung. Man kann dadurch auch hier die Zersetzung sozusagen sehen. Der weitere Entladungsverlauf ist uninteressant. Der Niederschlag aber war sehr bemerkenswert, das ganze Rohr war nach dem Entladungsdurchgang mit einem intensiven braunen Niederschlag bedeckt, der stellenweise hellbraun war und genau dasselbe Aussehen zeigte, wie der gesuchte Niederschlag. Außerdem hatten sich in dem unteren Teil des senkrecht angeordneten Entladungsrohres äußerst dünne schwarze Partikelchen angesammelt, die eine Oberfläche von der Größenordnung 1 qmm hatten und den Eindruck erweckten, als ob sie von der Oberfläche des Niederschlages in der Entladungsrohre abgeblättert wären. Der in der zitierten Untersuchung gefundene Niederschlag war also offenbar durch Verunreinigung des Wasserstoffs mit Benzoldampf verursacht. Da der Benzoldampf nach den Versuchen mit den mit Benzoldampf karburirten Flammen unter normalen Umständen nicht durch ein Palladiumrohr dringt, so bietet die Erklärung für das Auftreten des Benzoldampfes große Schwierigkeiten, wenn man nicht annimmt, daß die Palladiumrohre unter Umständen ihre Struktur sehr wesentlich ändern können. Dann wird allerdings auch die Grahamsche Beobachtung verständlich.

Wegen der Art des Niederschlages aus Benzoldampf erschien es von Interesse, diesen näher zu untersuchen. Vor allem deshalb, weil es sich hier bestimmt nicht um reinen Kohlenstoff handelte, da der Niederschlag trotz äußerst geringer Menge deutlich roch. Für eine genaue Analyse aber

war die Menge viel zu gering. Der Geruch ließ auf Diphenyl schließen. Es wurde nun die Entladungsapparatur etwas umgeändert, um möglichst größere Mengen des Körpers zu erhalten. Statt eines Kolbens wurden nun zwei Kolben für das Benzol (chemisch rein zur Molekulargewichtsbestimmung) verwendet, zwischen die das Entladungsrohr geschaltet war. So konnte bei fort dauerndem Pumpen durch Verwendung von zwei Kältemischungen verschiedener Temperatur das Benzol und jedes evtl. entstehende dampfförmige Produkt durch das Entladungsrohr hindurch von einem Kolben in den anderen hin und her destilliert werden, wodurch sich auf die Dauer das Benzol mit dem gesuchten Entladungsprodukt anreichern mußte. Nach vielstündigem Betrieb wurde dann der Inhalt des Entladungsrohres und die Benzollösung, denn um eine solche handelt es sich nunmehr, genau untersucht. Hr. Dr. H. Berger vom Chemischen Institut der Universität Köln war so liebenswürdig, diese Untersuchung wie auch die von den folgenden Proben vorzunehmen, wofür ihm auch an dieser Stelle mein herzlicher Dank ausgesprochen sei. Sein Ergebnis war folgendes: Der Röhreninhalt, der mit chemisch reinem Benzol ausgespült wurde, soweit es ging, bestand aus einem festen gelbbraunen bis schwarzen Belag der Wände und einer Benzollösung. Der feste Körper war in allen gebräuchlichen organischen Lösungsmittel unlöslich. Er bestand aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Die Benzollösung wurde im Vakuum eingedampft. Es hinterblieben schmierige Kristalle, die auf Ton abgepreßt wurden. Nach dem Umkristallisieren aus Alkohol zeigten sie den konstanten Schmelzpunkt 70°. Nach Geruch und Schmelzpunkt handelte es sich um Diphenyl. Die Mischung mit Diphenyl anderer Herkunft zeigte keine Depression des Schmelzpunktes. Auch mikroskopisch waren die Kristalle nicht von anderem Diphenyl zu unterscheiden. Es wurde nun mit der gleichen Apparatur untersucht, ob die durch die Entladung entstehenden Produkte irgendwie von der Art der elektrischen Entladung abhängen. Deshalb wurde bei sonst völlig gleichen Versuchsbedingungen statt eines Außenelektrodenrohres ein Elektrodenrohr benutzt, das nicht mit hochfrequenten Schwingungen, sondern mit dem Strom eines Induktoriums betrieben wurde. Die entstehende Benzollösung wurde wieder

untersucht. Die Untersuchung geschah in derselben Weise wie oben. Die umkristallisierten Kristalle zeigten keinen einheitlichen Schmelzpunkt (65—79°). Es kann sich dabei um ein Gemisch von Diphenyl, Biphenylen und höheren Isomeren handeln. Gemäß den Strukturformeln für Benzol, Diphenyl usw. müßte man sich also die Wirkung der Entladung so vorstellen, daß durch die Entladung beispielsweise zwei Benzolmoleküle je ein H-Atom abgespalten bekommen und bei einem gelegentlichen Zusammenstoß dann sich mit ihren freigewordenen Valenzen verbinden. Nach diesem Mechanismus müßten also H-Atome abgespalten werden und demgemäß das Spektrum die Balmerserie stark zeigen. Das Spektrum der Entladung zeigte auch u. a. die Linien H_{α} und H_{β} sehr stark, während das Viellinienspektrum nicht oder äußerst schwach zu sehen war. Diese Tatsache stimmt mit dem oben geschilderten Reaktionsmechanismus überein, beweist aber nichts, da sich auch ein Gemisch von Wasserstoff mit Benzol in einem Entladungsrohr aus bekannten Gründen (Vergiftung der Wandkatalyse) vermutlich ebenso verhalten würde. Schließlich wurde noch eine weitere Entladungsart untersucht. Es wurde unter sonst gleichen Bedingungen wieder ein Außenelektrodenrohr angewandt, in dem in der bekannten Weise und unter Benutzung eines großen Induktoriums eine elektrodenlose Ringentladung erzeugt wurde. Die Untersuchung der auf diese Weise entstandenen Entladungsprodukte ergab wieder nicht ganz einheitliche Kristalle, die in der Hauptsache aus Diphenyl bestanden. Die Art der Entladung hat offenbar keinen Einfluß auf die Art der aus dem Benzoldampf durch die Entladung entstehenden Produkte. Dagegen hat die Stromstärke und der Potentialgradient in den Entladungsrohren einen sehr großen Einfluß auf die Mengenverhältnisse der entstehenden Körper. Wie vorauszusehen, werden bei großen Potentialgradienten sehr viel größere Mengen hochpolymerer Kohlenwasserstoffe gebildet, wogegen die Bildung des Diphenyls durch schwächere Potentialgradienten bevorzugt wird.

Zusammenfassung

Der durch ein glühendes Palladiumrohr in eine Vakuumapparatur eingeleitete Wasserstoff wurde genau auf die Reinheit

untersucht. Der Wasserstoff erwies sich als völlig rein, selbst dann noch, wenn die Umgebung des Palladiumrohres künstlich mit verschiedenen Dämpfen verunreinigt worden war.

Es wurden die Entladungerscheinungen in den Dämpfen von Äther, Äthylalkohol, Aceton, Eisessig, Chloroform, Tetrachlorkohlenstoff und Benzol qualitativ untersucht bei Benutzung einer Hochfrequenzglimmentladung. In allen Fällen konnte die Zersetzung des Dampfes beobachtet werden. Bei allen Dämpfen ergab sich ein Niederschlag, der entweder aus Kohlenstoff oder einer Kohlenstoffverbindung¹⁾ von höherem Molekulargewicht bestand.

Die Entladungsprodukte aus der Hochfrequenzglimmentladung in Benzol wurden eingehender untersucht. Es handelte sich um die Bildung von Diphenyl, Biphenylen und höheren Isomeren. Die Art der elektrischen Entladung scheint auf die Entladungsprodukte keinen Einfluß zu haben. Dagegen sind die Mengenverhältnisse der gebildeten Körper abhängig von Stromstärke und Potentialgradient in der Entladungsrohre. Genauere quantitative Untersuchungen wurden nicht gemacht, da diese über das rein technisch-experimentelle Ziel der Feststellung der Zuverlässigkeit der Wasserstoffeinleitung durch Palladium hinausgegangen wären.

Den Herren cand. phil. L. Ebeler und R. Gumm, sowie vor allem cand. phil. Boussonville sei auch an dieser Stelle für viele technische Hilfe bestens gedankt.

Der Maschinenfabrik Sürth bei Köln schulde ich Dank für die Überlassung der benötigten Mengen flüssiger Luft.

Köln, Physikalisches Institut der Universität.

1) Der Kohlenstoffniederschlag aus organischen Dämpfen in elektrischen Entladungen ist natürlich seit langem bekannt (vgl. z. B. H. Konen, Ann. d. Phys. 9, S. 742, 1902), kaum dagegen die Bildung der Kohlenstoffverbindungen von höherem Molekulargewicht.

(Eingegangen 9. Mai 1929)

***Über die beim Diamagnetismus der Gase
gefundene Anomalie***

IV. Mitteilung¹⁾

Sauerstoffbeimischungen

Von August Glaser

(Mit 8 Figuren)

Schon bei den ersten Versuchen die Druckabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität zu messen, war mir der außerordentliche Einfluß von Verunreinigungen des Versuchsgases durch fremde Gase auf den Effekt, über den in Mitteilung 1 und 2 berichtet wurde, aufgefallen. Dies hat sich im Laufe der Zeit immer wieder gezeigt. Auch Hr. J. Port, der, wie ich schon berichtete²⁾, längere Zeit hindurch an diesen Versuchen teilnahm, hat eine Reihe von Beobachtungen in dieser Hinsicht gemacht. So existierte wohl schon ein erheblicher Teil der Ergebnisse, die in der vorliegenden Arbeit dargestellt werden sollen, in Form von gelegentlichen, qualitativen Beobachtungen, bevor mit einer systematischen Untersuchung des fraglichen Tatsachenkomplexes begonnen werden konnte.

Es bestand von vornherein Sicherheit darüber, daß die den genannten Effekt so außerordentlich beeinflussenden Verunreinigungen allein Spuren von Sauerstoff sein konnten; denn immer, wenn diese Einflüsse bemerkt wurden, zeigte sich, daß die zur Beseitigung des Sauerstoffes dienende Apparatur — ein mit Kupfergriff und Kupferdrahtnetz gefülltes Porzellanrohr, das mittels eines Verbrennungsofens geheizt wurde — nicht in Ordnung war, sei es, daß das Kupfer schon weitgehend oxydiert war oder daß es unzweckmäßig erhitzt wurde.

1) A. Glaser, I. Mitt., Ann. d. Phys. [4] 75. S. 459. 1924; II. Mitt. [4] 78. S. 641. 1925; III. Mitt. [5] 1. S. 814. 1929.

2) Vgl. III. Mitt. S. 817.

War dagegen Vorsorge getroffen, daß selbst Spuren von Sauerstoff aus dem Gase entfernt waren; so trat der Effekt in der gewohnten Form zutage. Eine umfangreiche Studie am Wasserstoff hat das bewiesen. Bekanntlich kann Wasserstoff mit Hilfe von rotglühendem Platinasbest oder mäßig erhitztem Palladiumasbest vollkommen vom Sauerstoffe, den das aus dem Kippsschen Apparat entwickelte Gas neben anderen Verunreinigungen immer spurenweise enthält, gereinigt werden, wobei besonders im letzteren Falle die übrigen Verunreinigungen erhalten bleiben. Läßt man dagegen den Rohwasserstoff durch die Wandung eines hochglühenden Palladiumröhrcchens diffundieren, so werden bekanntlich sämtliche Verunreinigungen zurückgehalten. Es zeigte sich nun stets, daß das nur sauerstofffreie Gas schon den gewohnten Effekt zeigte, die Beseitigungen der übrigen Beimengungen aber keine meßbare Änderung des Bildes mehr ergab. Auf Grund dieses Befundes konnte dann auch ein zweckmäßiger Modus der Heizung des Kupferrohres gefunden werden, so daß auch für die übrigen Gase, die nicht mit Hilfe von Platin- oder Palladiumasbest vom Sauerstoffe befreit werden können, eine hinreichende Reinigung von etwa vorhandenen Sauerstoffspuren sichergestellt war. In einer späteren Arbeit, die sich mit einer Kritik der von mir verwendeten Methoden befassen wird, soll hiervon noch ausführlich die Rede sein.

Die Apparatur, die ich in der vorliegenden Arbeit verwendet habe, war bis in alle Einzelheiten die gleiche, wie die in der 2. Mitteilung beschriebene. Neu hinzugekommen ist lediglich die zwischen Gasreinigung und Apparat angesetzte Vorrichtung zur Herstellung von definierten Sauerstoffgemischen, deren schematisches Bild Fig. 1 zeigt. Im Hartglasrohre *A* wurde Kaliumpermanganat gelinde erhitzt. Dabei gibt es bekanntlich, wenn es nicht in fahrlässiger Weise verunreinigt war, einen sehr reinen, trockenen Sauerstoff ab. Als einzige Verunreinigung kommen Spuren von Kohlendioxyd in Frage, die durch Verbrennung der unvermeidlichen organischen Stäubchen im heißen Sauerstoffe erzeugt werden. Sie werden in dem mit trockenem Kaliumhydroxyde beschickten Absorptionsgefäß *B* beseitigt. *A* und *B* wurden vor der Gasentwicklung vollständig evakuiert. Nachdem sie sich bis zu Atmosphärendruck mit Sauerstoff gefüllt hatten, wurde längere Zeit mit

frisch entwickeltem Gase gespült, so daß die beim ersten Erwärmen von *A* freigewordenen Luftbestandteile sicher verdrängt wurden. Dann wurde das vorher sorgfältig evakuierte Vorratsgefäß *C*, das etwa 1 Liter Inhalt hatte, gefüllt, und außerdem eine Probe des Sauerstoffes zur Suszeptibilitätsbestimmung (Reinheitsprüfung) in den Apparat gelassen. Bei der Herstellung eines Gemisches wurde folgendermaßen verfahren. Kugel *D* (13,5 ccm) wurde bis zu einem bestimmten Drucke mit Sauerstoff, Kugel *E* (2085 ccm) bis zu einem bestimmten Drucke

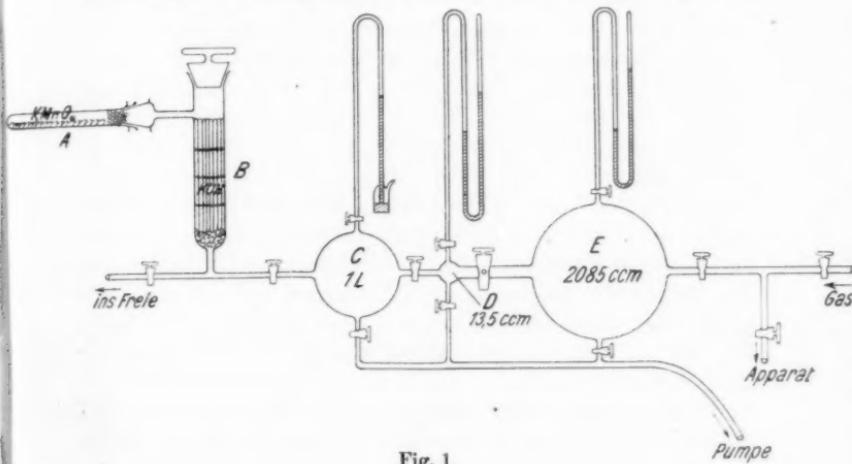


Fig. 1

mit einem diamagnetischen Gase gefüllt. Dann wurden die Hähne zu den Manometern geschlossen und der weite Hahn zwischen *D* und *E*, dessen Bohrung evakuiert war, geöffnet, so daß die beiden nach Druck und Volumen jener bekannten Gasmengen sich mischen konnten. Nach einer hinreichend großen Pause wurde dann das Gemisch in den vorher evakuierten Apparat eingelassen. Um eine gleichmäßige Verteilung der Komponenten des Gemisches über die Kugeln und den Apparat zu gewährleisten, wurde die Verbindung zwischen Apparat und Kugeln mehrere Stunden aufrecht erhalten, und dann erst mit der Messung begonnen. Die Kalibrierung der Kugeln geschah bei *D* mit Quecksilber, bei *E* mit Wasser bis zu den der betr. Kugel zunächst liegenden Seite der Hähne.

Auf diese Weise konnte zwar der Apparat, in dem die Messung der Suszeptibilität vorgenommen wurde, nie ganz bis zu Atmosphärendruck mit Gas gefüllt werden, da das hergestellte Gemisch selbst nur Atmosphärendruck besaß, und die Füllung des Apparates lediglich durch Expansion des Gemisches auf das vorher ausgepumpte Apparatvolumen bewerkstelligt wurde. Die so im Apparat erzielten Drucke reichten jedoch eben aus, um die gewünschten Messungen anstellen zu können.

Der Hergang einer Messung spielt sich im übrigen genau so ab, wie dies in früheren Arbeiten geschildert wurde.

Im allgemeinen wurde — wie gewöhnlich — der Apparat in der oben beschriebenen Weise zuerst bis zum Höchstdrucke gefüllt, und dann nach tieferen Drucken fortschreitend die Druck-Suszeptibilität-Kurve gewonnen. Um aber sicher zu gehen, daß nicht etwa eine, durch das langsame, sukzessive Abpumpen des Gases hervorgerufene Änderung des Mischungsverhältnisses (infolge verschiedener Diffusionsgeschwindigkeiten der beiden Komponenten durch die kleine Öffnung des Hahnes) die Ursache für das beobachtete Phänomen bildete, wurde zuweilen der umgekehrte Weg — von tieferen zu höheren Drucken — eingeschlagen. Hätte eine merkliche Entmischung durch Diffusion stattgefunden, so hätte im ersteren Falle eine Anreicherung der einen Komponente im Apparat im zweiten Falle eine Anreicherung derselben Komponente in der Mischkammer also eine Minderung der anderen Komponente im Apparat erfolgen müssen. In beiden Fällen zeigte sich jedoch nicht der geringste Unterschied in den gewonnenen Ergebnissen, so daß die Annahme wohl berechtigt erscheint, daß durch die Diffusion keine merkliche Entmischung zustande kam.

Untersucht wurden Sauerstoff-Kohlensäure- und Sauerstoff-Argongemische. Die reinen Gase wurden in der bereits geschilderten Weise dargestellt bzw. gereinigt. Ihre Reinheit wurde mit Hilfe von Suszeptibilitätsmessungen kontrolliert.

Die Ergebnisse sind in den Figg. 2, 3 (Sauerstoff-Kohlensäure), 4 (Sauerstoff-Argon, Argon verschiedener Reinheitsgrade mit unbekanntem Sauerstoffgehalt, gewonnen durch verschiedene intensive Reinigung) und 5 (Sauerstoff-Argon; definierte Gemische) dargestellt. Messungsbeispiele enthalten die Tab. 1 und 2.

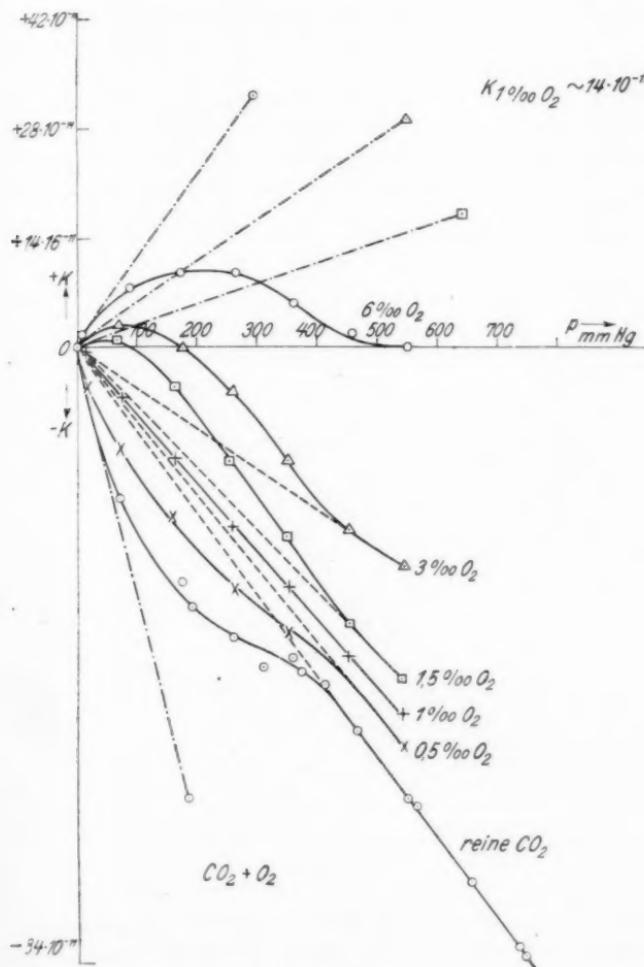


Fig. 2

Das Argon benimmt sich auch hier wieder durchaus „vernünftig“, wie die Figg. 4 und 5 zeigen. Dem reinen Argon und den Gemischen mit verschiedenem Sauerstoffgehalt entspricht ein Bündel gerader Linien, mit verschiedenen Neigungen

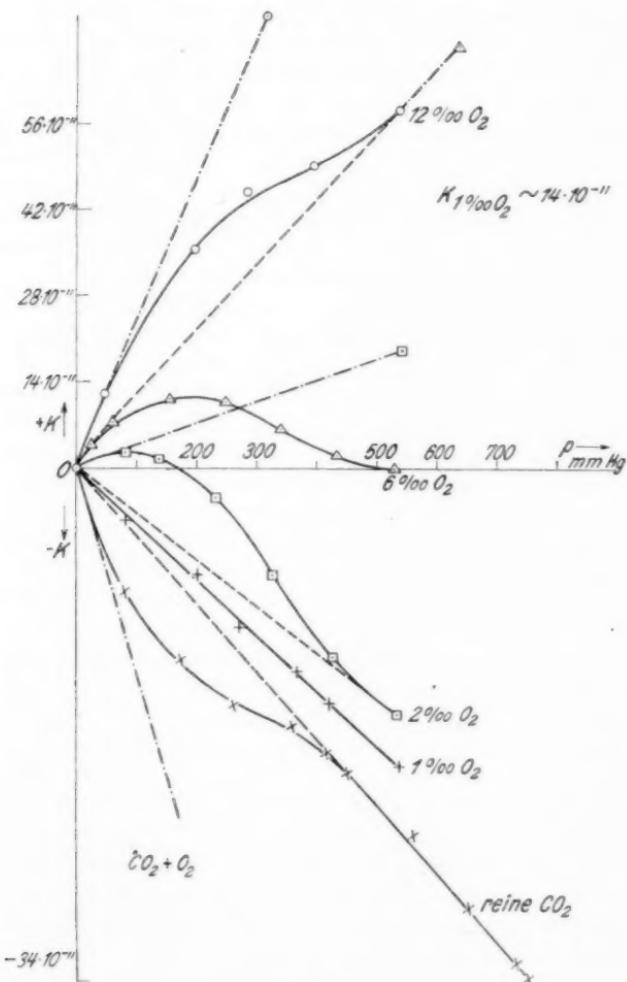


Fig. 3

gegen die Abszissenachsen. Diese Neigungswinkel, d. h. die diamagnetische Suszeptibilität des Gemisches wird mit wachsendem Gehalte an paramagnetischem Sauerstoff und sinkendem

Gehalt an diamagnetischem Argon kleiner und zwar in dem Maße, wie es dem Mischungsverhältnis entspricht.

Um so erstaunlicher sehen die Bilder der Sauerstoff-Kohlensäuregemische aus. Die Neigungsänderung des geradlinigen Teiles der in den Figg. 2 und 3 dargestellten Kurven entspricht — wie beim Argon — genau der Suszeptibilitätsänderung der Gemische infolge des Sauerstoffzusatzes, so daß

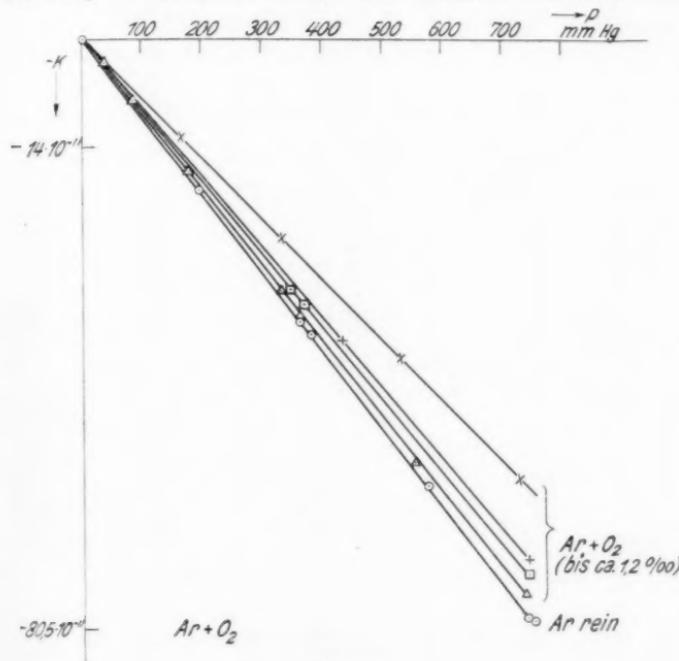


Fig. 4

im geradlinigen Teile der Kurven der Einfluß der Sauerstoffbeimengungen durchaus normal ist. In dem Druckbereiche aber, in welchem das reine Gas die bekannte Anomalie zeigt, ist auch der Einfluß der Sauerstoffbeimengung anomalous. Mit wachsendem Sauerstoffzusatz wird die Ausbuchtung der Kurven anscheinend stetig immer flacher und flacher, bis bei einem Zusatze von etwa einem Volumenpromille Sauerstoff eine vollkommen gerade Linie erreicht wird. Steigert man den Sauer-

stoffzusatz nun über ein Volumpromille hinaus, so entsteht in der Gegend der bisherigen Anomalie mit wachsendem Sauerstoffzusatz eine Ausbuchtung nach der entgegengesetzten Seite. Der Verlauf dieser Ausbuchtungen ist ein derartiger, daß schon bei Beimengungen, die ein Volumpromille nur wenig überschreiten, bei welchen die Ausbuchtung nach oben sehr flach ist, die Kurven die Abszissenachse bei einem niedrigen Druck nach oben überschreiten. Unterhalb dieses Druckes erscheint dann das ursprünglich diamagnetische Gemisch paramagnetisch.

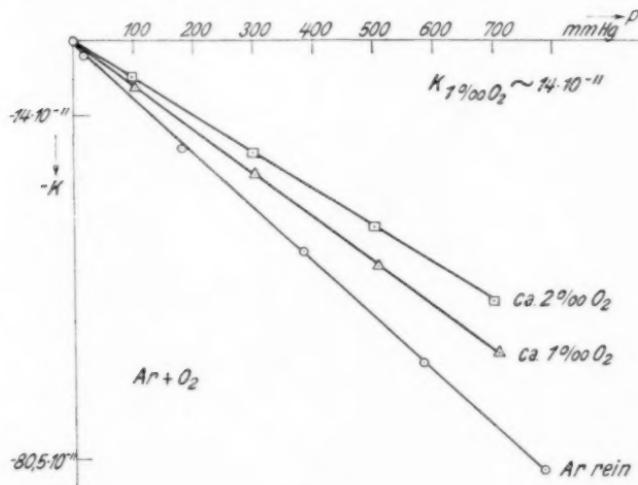


Fig. 5

Der Grenzwert, dem die Suszeptibilität des nunmehr paramagnetischen Gemisches zuzustreben scheint, ist offensichtlich die „Partialdrucksuszeptibilität“ des beigemischten Sauerstoffes, d. h. diejenige Suszeptibilität, die der Sauerstoff hätte, wenn er bei einem Druck, der seinem Partialdruck im Gemisch entspricht, allein vorhanden wäre. Diese Partialdrucksuszeptibilitäten sind in den Figuren als -----Liniens eingezeichnet. Es sieht also so aus, als ob bei diesen tiefen Drucken nur noch der Sauerstoff allein einen Beitrag zur Suszeptibilität des Gemisches lieferte und zwar in voller Höhe, die Kohlensäure jedoch überhaupt keinen mehr. Zu bemerken ist schließ-

Tabelle 1

Versuchstemperatur 15° C. Betriebsstrom des Magneten 8 Amp.

Druck des Gases mm	Einstellung des Torsionskopfes	Differenz der Einstellungen
Reine Kohlensäure		
730	342° 10'	—
418	339 45	145'
362	339 30	15
262	339 15	15
175	338 45	30
80	338	45
0	336 20	100
Gemisch 1. Druck in der O ₂ -Kugel (D) 102 mm; " " " CO ₂ " (E) 745 "		
534	359° 24'	—
419	358 40	44'
362	358 20	20
268	357 50	30
174	357 10	40
80	356 40	30
0	356 5	35
Gemisch 2. Druck in der O ₂ -Kugel (D) 198 mm; " " " CO ₂ " (E) 747 "		
533	359° 5'	—
417	358 20	40'
325	357 30	55
230	356 40	50
135	356 15	25
80	356 10	5
10	356 15	—5
Gemisch 3. Druck in der O ₂ -Kugel (D) 650 mm; " " " CO ₂ " (E) 741 "		
530	324° 25'	—
433	324 17	8'
342	324	17
250	323 40	20
155	323 40	—
60	323 55	—15
23	324 10	—15
Gemisch 4. Druck in der O ₂ -Kugel (D) 1225 mm; " " " CO ₂ " (E) 746 "		
5	38° 40'	—
44	38 20	20'
149	37 25	55
287	37	25
400	36 45	15
548	36 20	25

Tabelle 2

Versuchstemperatur 15° C. Betriebsstrom des Magneten 8 Amp.

Druck des Gases mm	Einstellung des Torsionskopfes	Differenz der Einstellungen
Reines Argon		
781	349° 33'	—
580	348 20	73'
380	347 5	75
180	245 55	70
15	245	55
Gemisch 1. Druck in der O ₂ -Kugel (D) 102 mm; " " " A " (E) 785 "		
705	348°	—
502	347	60'
300	346	60
100	345	60
0	344 30'	30
Gemisch 2. Druck in der O ₂ -Kugel (D) 207 mm; " " " A " (E) 775 "		
700	351°	—
500	350 10'	50'
300	359 20	50
98	348 30	50
0	348 5	25

lich noch, daß es den Anschein hat, als ob sich mit wachsenden Sauerstoffzusätzen die Stelle, an welcher die Druckproportionalität der Suszeptibilität aufhört, die Kurven sich also nach unten bzw. oben auszubauen beginnen, etwas zu höheren Drucken verschoben. Ich möchte dem jedoch nicht zuviel Bedeutung beimesse. Die Frage, wo die Abzweigung von der Geraden genau liegt, ist ohnehin bei der Flachheit der Kurven etwas problematisch. Sie soll später mit einer wesentlich empfindlicheren Apparatur untersucht werden.

Wollte man zur Erklärung dieses eigenartigen Verhaltens der Gemische Sauerstoff-Kohlensäure eine Entmischung infolge der verschiedenen Ausströmungsgeschwindigkeiten der beiden Komponenten durch den Hahn beim sukzessiven Abpumpen heranziehen, so würde man beim gewöhnlichen Gange eines Versuches (Abpumpen des Gases aus dem Apparat) gerade das umgekehrte erwarten müssen: eine Anhäufung von Kohlensäure im Apparat und eine Vergrößerung der diamagnetischen Suszepti-

tibilität des Gemisches. Abgesehen davon hätte dann die oben erwähnte, gelegentliche Umkehrung des Versuchsganges (Ausströmen des Gases aus der Mischkammer in den Apparat) das umgekehrte Ergebnis haben müssen. Schließlich hätten dann doch die Versuche mit den Argon-Sauerstoffgemischen ein analoges Ergebnis zeitigen müssen.

Ebensowenig kann aber an eine magnetische Entmischung gedacht werden. Da auch nur annähernd hinreichende Temperaturdifferenzen im Bereich der stärksten Felder bei meiner Versuchsanordnung nicht vorhanden sind, so käme allein eine Entmischung auf Grund der Magnetostraktion der einzelnen Komponenten in Frage (Partialdruckerhöhung der paramagnetischen Komponente, Partialdruckerniedrigung der diamagnetischen Komponente im Bereich der stärksten Felder). Abgesehen davon, daß eine derartige Entmischung prozentual

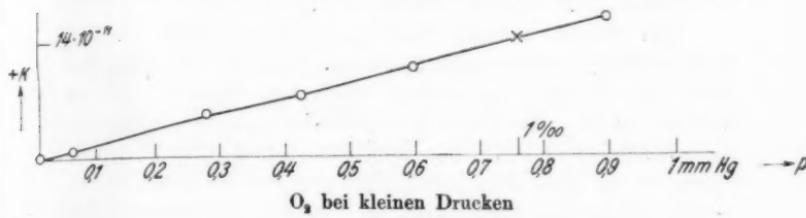


Fig. 6

genommen bei allen Drücken doch wohl gleich groß sein müßte, also doch nur eine Neigungsänderung der Kurve ergäbe, sind die Magnetostraktionseffekte an Gasen viel zu klein, als daß sie eine an der Suszeptibilität meßbare Entmischung ergeben könnten.

Obwohl die Messungen an den Argongemischen, und der allgemeine Habitus der bei den Kohlensäuregemischen erhaltenen Kurven es nicht als wahrscheinlich erscheinen läßt, daß die Partialdrucksuszeptibilität des beigemengten Sauerstoffes nicht druckproportional abnehme, habe ich der Vollständigkeit halber doch noch die Druckabhängigkeit der Sauerstoffsuszeptibilität im Gebiete kleinster Drucke untersucht und die in Fig. 6 dargestellte erwartete Linearität festgestellt. Für höhere Drucke — bis zu 16 Atm. — hatte ich schon in der 2. Mitteilung Druckproportionalität der Sauerstoffsuszeptibilität gefunden.

Die übrigen Gase, an denen ich bisher Suszeptibilitätsmessungen anstellte, zeigen ein durchaus analoges Verhalten bei Sauerstoffbeimischung. (Geradlinigkeit bei etwa 1 Promille, starke Ausbuchtung nach oben schon bei etwa 2 Promille Sauerstoffbeimengung) Es wurde dies jedoch nur qualitativ gelegentlich beobachtet. Auf eine quantitative Nachprüfung habe ich in diesen Fällen verzichtet.

Von Interesse wären natürlich noch Messungen an Gemischen der diamagnetischen Gase mit den beiden anderen paramagnetischen Gasen Stickoxyd und Chlordioxyd. Letzteres scheidet wegen seiner überaus unangenehmen chemischen Eigenschaften wohl von vornherein aus. Auch das Stickoxyd ist in Metallapparaturen nicht leicht zu handhaben. Diesbezügliche Untersuchungen sollen daher erst unternommen werden, wenn einmal sichergestellt ist, daß die Apparatur nachher zu keinerlei Messungen mehr benötigt werden wird.

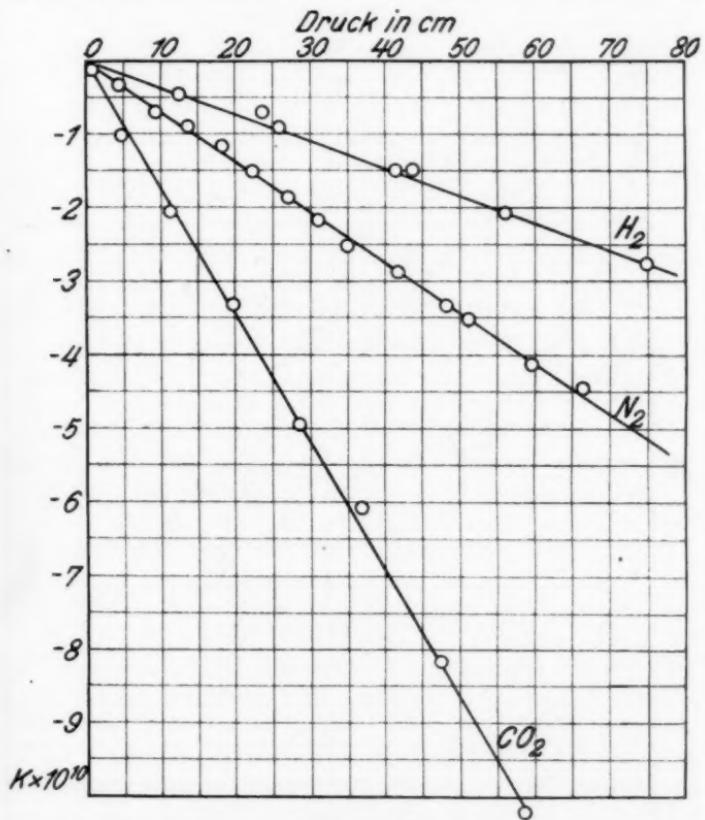
Zum Schluß müssen hier noch einige Worte zu den Hamarschen Arbeiten gesagt werden. Hamar¹⁾ benützte, so weit sich das aus den äußerst spärlichen Angaben, die er darüber macht, beurteilen läßt, offenbar genau die gleiche Meßmethode wie ich. Das Ergebnis seiner ersten Arbeit, welche er im Titel als einen vorläufigen Bericht kennzeichnet — eine endgültige Publikation ist, soweit mir bekannt, bis heute nicht erfolgt — exakte Druckproportionalität der Suszeptibilitäten von Wasserstoff, Stickstoff und Kohlensäure. Fig. 7 gibt die entsprechende Hamarsche Figur wieder.²⁾ In seiner zweiten Arbeit³⁾, die gleichzeitig mit der ersten publiziert ist, weist Hamar auf eine mögliche Erklärung meiner Ergebnisse hin. Er sagt kurz folgendes: Er habe aus irgendeinem Anlaß seine Messungen am Wasserstoffe, die bis dahin immer Druckproportionalität der magnetischen Suszeptibilität ergeben hätten, unterbrochen. Als er sie nach einiger Zeit fortgesetzt habe, habe er in drei Messungsreihen die in Fig. 8 mit Kreuzen bezeichnete Kurve I erhalten. Daraufhin habe er seine mit Phosphorpentoxyd beschickten Trockenrohre, die im Gasreinigungswege lagen, untersucht, und einen dünnen glasigen

1) G. W. Hamar, Proc. Nat. Acad. 12. S. 594 u. 597. 1926.

2) a. a. O. S. 596.

3) a. a. O. S. 597.

Überzug auf dem Phosphorpentoxyd des letzten Trockenrohres gefunden. Er habe daraufhin dieses Phosphorpentoxyd erneuert und nun die Kurve II erhalten, deren Ausbuchtung



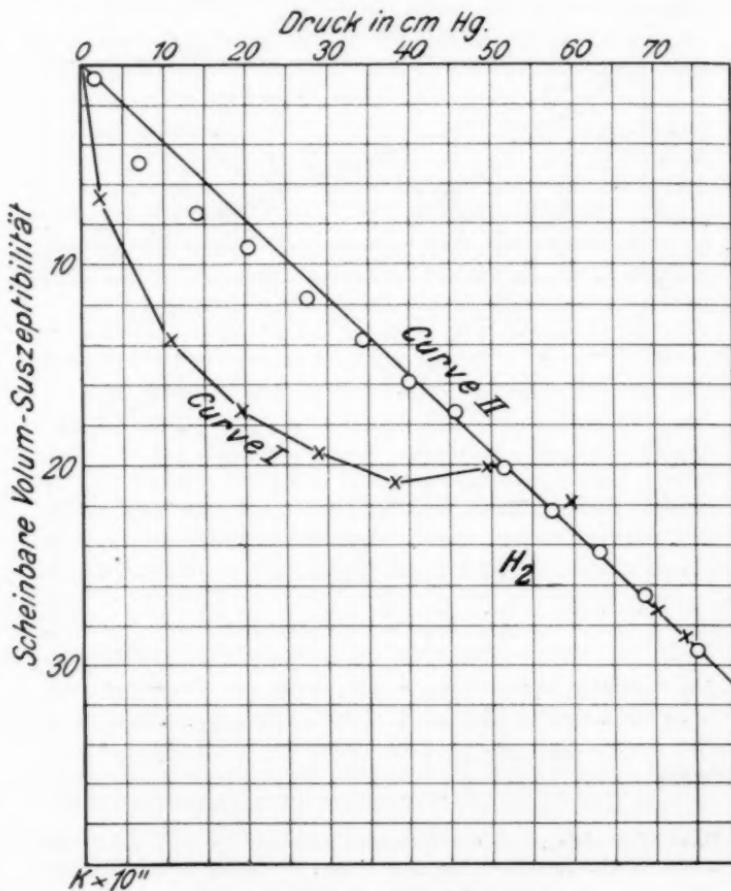
Diese Werte hängen ab vom Suszeptibilitätswerte der Luft, der gesetzt wurde gleich: $2,98 \cdot 10^{-8}$ für $24,5^\circ C$ und 76 cm Hg Druck (Hamar)

Hamar's Fig. 2 aus der ersten Arbeit

Fig. 7

offensichtlich viel kleiner ist, als die der Kurve I. Hamar schließt hieraus, daß im Falle der Kurve I mehr, im Falle der Kurve II weniger Wasserdampf in der Apparatur vor-

handen gewesen sei, und daß auf seinem Stäbchen adsorbierte Wasserhäute von verschiedener Dicke die Ausbuchtungen der Kurven I und II erzeugt hätten.



Hamars Figur aus der zweiten Arbeit

Fig. 8

Ich möchte mich dieser Argumentation nicht anschließen. Phosphorpentoxid ist, auch wenn es eine dünne glasige Oberflächenschicht von Phosphorsäuren, ja selbst, wenn es schon

z. T. zu einer bräunlichen Jauche zerlaufen ist, immer noch ein ausgezeichnetes Trockenmittel. Es können also in der Apparatur nur äußerst kleine Wasserdampfdrucke vorhanden gewesen sein. Wie unter diesen Verhältnissen eine hinreichend starke adsorbierte Wasserschicht auf dem Glasstäbchen vorhanden gewesen sein soll und wie eine solche Schicht, selbst wenn sie vorhanden gewesen sein sollte, einen derartigen Effekt hätte hervorrufen können, ist nach allem was man über Adsorption heute weiß, unerklärlich. Daß Wasserdampf allein derartige Effekte nicht hervorrufen kann, zeigen meine Messungen an mit Wasserdampf beladenem Argon, über die ich kürzlich¹⁾ berichtete eigentlich schon zur Genüge. Ich werde aber auf diesen Punkt wie auf die Frage der Adsorption, bei einer späteren Gelegenheit noch ausführlich zurückkommen.

Viel näher scheint mir vielmehr die Möglichkeit zu liegen, daß die Hamarschen Ergebnisse durch die Anwesenheit von Spuren von Sauerstoff in der oben geschilderten Weise beeinflußt sind. Man wird wohl nicht irre gehen, wenn man vermutet, daß infolge der von Hamar vorgenommenen Auswechslung des Phosphorpentoxydes zwischen den Messungen I und II (Fig. 8), die am neueingefüllten Phosphorpentoxid haftenden Luftreste das Gas, an dem die Messung II vorgenommen wurde, verunreinigt haben werden. Die Fig. 8 zeigt bei oberflächlicher Betrachtung eine nicht zu leugnende Ähnlichkeit mit meinen Figg. 2 und 3. Allerdings fehlt der Neigungsunterschied, der zwischen Kurve I und II vorhanden sein müßte, wenn das Gas im Falle II Sauerstoff enthalten hätte, im Fall I aber keinen. Über das Zustandekommen dieser Abweichung der Hamarschen Ergebnisse von den meinigen, ist man leider nur auf Vermutungen angewiesen, so daß es unmöglich ist, darauf näher einzugehen. Ich möchte daher nur auf das eine hinweisen, daß die Werte, die sich aus Fig. 7 nach Hamars Messungen für die Suszeptibilitäten der betreffenden Gase bei Atmosphärendruck ergeben, sowohl absolut wie relativ genommen, von den bisher anerkannten Werten anderer Autoren z. T. sehr stark abweichen, also wohl falsch sein dürften. Tab. 3 zeigt das mit hinreichender Deut-

1) Vgl. III. Mitt., S. 819.

Tabelle 3

Gas	Hamars Suszeptibilitäts-werte (von A. Glaser aus Hamars Figur entnommen)	Hamars Werte bezogen auf Wasserstoff	Werte anderer Autoren
H_2	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$1,71 \cdot 10^{-10}$ (Hector u. Wills)
N_2	$5,3 \cdot 10^{-10}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$4,91 \cdot 10^{-10}$ (Hector)
CO_2	$13,0 \cdot 10^{-10}$	$8,2 \cdot 10^{-10}$	$8,4 \cdot 10^{-10}$ (Take Soné)

Bemerkungen zur Tabelle: Umrechnungsfaktor (Spalte 3) 0,63.

Der Bezugswert bei der Umrechnung (Spalte 3) stammt von Hector und Wills. Die Werte Hamars weichen absolut und relativ von den Werten anderer Autoren ab. Besonders stark fällt der Stickstoffwert heraus. Er ist um $1,5 \cdot 10^{-10}$ zu klein. 1 Volumpromille Sauerstoff verkleinert eine diamagnetische Suszeptibilität um rund $1,44 \cdot 10^{-10}$, wenn man nach Hector und Wills die Suszeptibilität von Sauerstoff bei Atmosphärendruck zu $1440 \cdot 10^{-10}$ annimmt.

lichkeit. Angesichts dieser so großen Abweichungen der absoluten und relativen Suszeptibilitätswerte von den bisher anerkannten, welche sich widerspiegelt in einem beträchtlichen Mißverhältnisse der Neigungen der Hamarschen „Geraden“ in Fig. 7 gegeneinander und gegen die Abszissenachse, wird man über das Fehlen eines Neigungsunterschiedes in Fig. 8 nicht erstaunt sein müssen und hoffen, daß eine endgültige Fassung der beiden Hamarschen Arbeiten, die doch wohl noch erscheinen wird, die Angelegenheit klarstellen möge.

Auch die vorliegende Arbeit war in allen ihren wesentlichen Teilen noch zu Lebzeiten von Hrn. Geheimrat W. Wien im physikalischen Institut der Münchener Universität abgeschlossen worden. So muß auch am Ende dieser Arbeit ein Wort des Dankes stehen an unseren verstorbenen Institutsvorstand für das große unentwegte Interesse, das er dieser Arbeit entgegenbrachte und die mannigfache Förderung durch Rat und Tat, die er ihr angedeihen ließ.

Hrn. Dr. F. Pollitzer danke ich bestens für das von der Gesellschaft Linde überlassene Argon.

München, Physikal. Inst. d. Universität.

(Eingegangen 11. Mai 1929)